

■ Unidades y factores de conversión

1 libra (lb) = 4.448 Newtons (N)

1 psi = libras por pulgada cuadrada

1 MPa = MegaPascal = MegaNewtons por metro cuadrado (MN/m²)
= Newtons por milímetro cuadrado (N/mm²) = 100,000,0 Pa

1 GPa = 1000 MPa = GigaPascal

$$1 \text{ ksi} = 1000 \text{ psi} = 6.895 \text{ MPa}$$

1 psi = 0.006895 MPa

$$1 \text{ MPa} = 0.145 \text{ ksi} = 145 \text{ psi}$$

■ Algunas relaciones, constantes y unidades útiles

Electron volt = 1 eV = 1.6×10^{-19} Joule = 1.6×10^{-12} erg

1 amp = 1 coulomb/segundo

$$1 \text{ volt} = 1 \text{ amp} \cdot \text{ohm}$$
 $k_B T$ a temperatura ambiente (300 K) = 0.0259 eV

c = velocidad de la luz 2.998×10^8 m/s

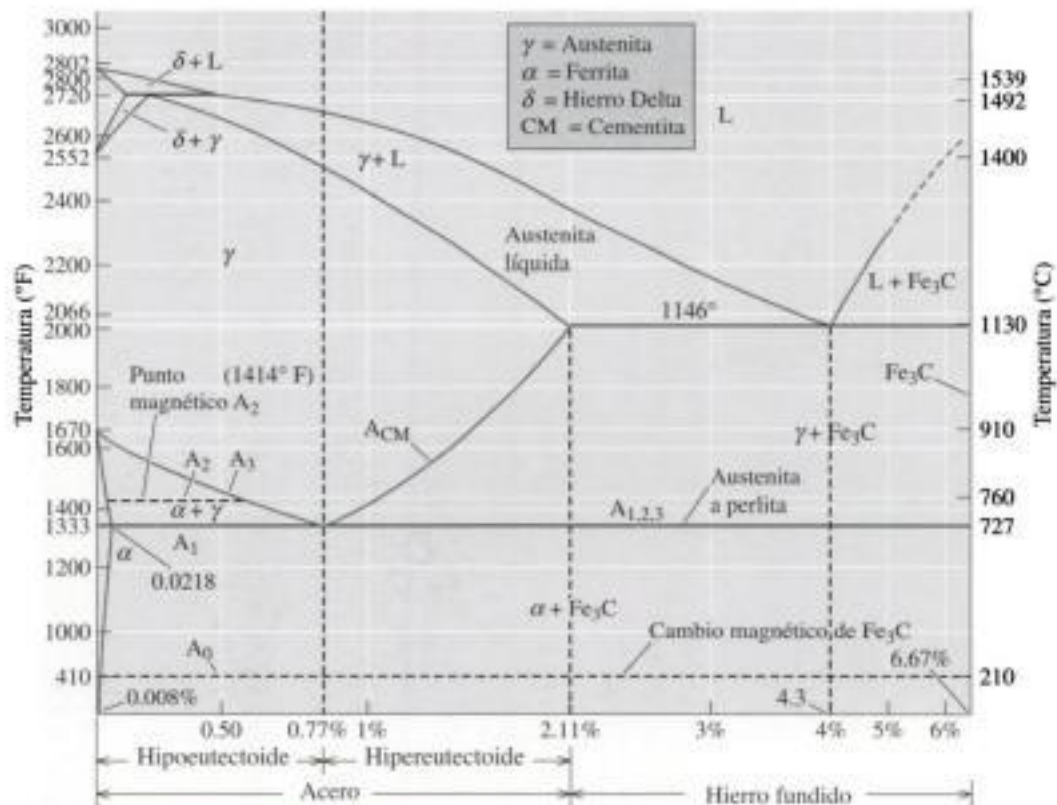
ϵ_0 = permisividad en espacio libre = 8.85×10^{-12} F/m

$q =$ carga de un electrón $= 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$

Número de Avogadro $N_A = 6.023 \times 10^{23}$

$$k_B = \text{Constante de Boltzmann} = 8.63 \times 10^{-5} \text{ eV/K} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

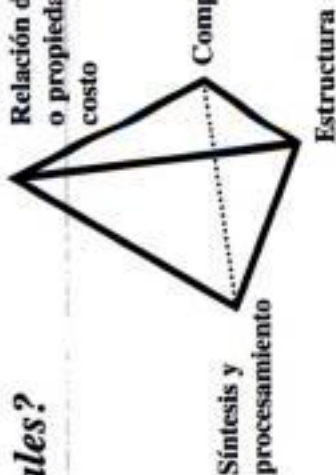
$h = \text{Constante de Planck } 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} = 4.14 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$



Fase eutectoide del diagrama de fases del Fe – Fe₃C.

¿Qué es ciencia e ingeniería de materiales?

Relación de desempeño
o propiedades entre
costo



Estructura de macroescala
Bloque de motor
≅ hasta 1 metro

Criterios de desempeño

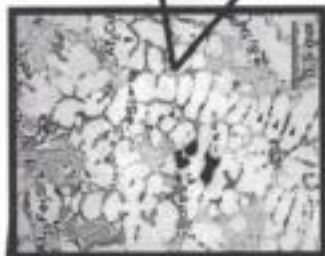
- Potencia generada
- Eficiencia
- Duración
- Costo



Microestructura
- Granos
≅ 1 a 10 milímetros

Propiedades afectadas

- Fatiga con muchos ciclos
- Ductilidad



Microestructura
- Dendritas y fases
≅ 50 a 500 micrómetros

Propiedades afectadas

- Resistencia a la fluencia
- Resistencia última a la tensión
- Fatiga con muchos ciclos
- Fatiga con pocos ciclos
- Crecimiento térmico
- Ductilidad



Nanoestructura
- Precipitados
≅ 3 a 100 nanómetros

Propiedades afectadas

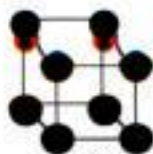
- Resistencia a la fluencia
- Resistencia última a la tensión
- Fatiga con pocos ciclos
- Ductilidad



Estructura a escala atómica
≅ 1 a 100 angstroms

Propiedades afectadas

- Módulo de Young
- Crecimiento térmico



Celda unitaria

MATERIAL PROMOCIONAL
PROHIBIDA SU VENTA

This One



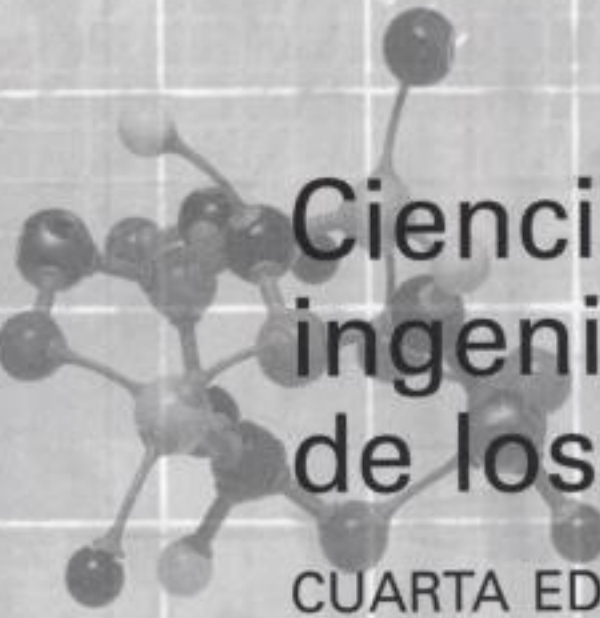
6L41-58J-DY2N

Un ejemplo de las propiedades importantes a escalas distintas, tomado del mundo real; esas propiedades son consecuencia de la sofisticada síntesis y procesamiento empleados y de las propiedades sobre las que influyen. Se muestran las estructuras a escalas atómicas, nano, micro y macro de las aleaciones fundidas de aluminio (para bloques de motor) en relación con las propiedades afectadas y el desempeño. El tetraedro de la ciencia e ingeniería de materiales que representa este método se ve en la esquina superior derecha.

(Ilustraciones cortesía de John Allison y William Donlon, Ford Motor Company)

Ciencia e ingeniería de los materiales

CUARTA EDICIÓN

Donald R. Askeland
University of Missouri—Rolla, Emeritus

Pradeep P. Phulé
University of Pittsburgh

THOMSON



Australia • Brasil • Canadá • España • Estados Unidos • México • Reino Unido • Singapur



Ciencia e Ingeniería de los materiales, 4a. ed.

Donald R. Askeland
Pradeep P. Phulé

Director general:
Miguel Ángel Toledo Castellanos

Director editorial y de producción:
José Tomás Pérez Bonilla

Editor de desarrollo:
Pedro de la Garza Rosales

Gerente de producción:
René Garay Argueta

Editor de producción:
Alejandro A. Gómez Ruiz

Supervisora de manufactura:
Claudia Calderón Valderrama

Traducción:
Virgilio González y Pozo y
Gabriel Sánchez García

Revisión técnica:
Ulises Figueroa López y
Olimpia Salas Martínez
ITESM-Campus Estado de México

COPYRIGHT © 2004 por
International Thomson Editores, S. A.
de C. V., una división de Thomson
Learning, Inc.
Thomson Learning™ es una marca
registrada usada bajo permiso.

Impreso en México
Printed in Mexico
3 4 06 05

Para mayor información contáctenos
en:
Séneca núm. 53
Col. Polanco
México, D. F., 11560

Puede visitar nuestro sitio en
<http://www.thomsonlearning.com.mx>

DERECHOS RESERVADOS. Queda
prohibida la reproducción o
transmisión total o parcial del texto
de la presente obra bajo
cualquiera formas, electrónica o
mecánica, incluyendo fotocopiado,
almacenamiento en algún sistema de
recuperación de información, o
grabado sin el consentimiento previo
y por escrito del editor.

Traducido del libro *The Science and
Engineering of Materials, 4th.*,
publicado en inglés por Brooks Cole,
©2003

ISBN 0-534-95373-5
Datos para catalogación
bibliográfica:
Askeland, Donald R., Phulé, Pradeep P.
Ciencia e ingeniería de los
materiales, 4a. edición.
ISBN 970-686-361-3
1. Ciencia e ingeniería de los
materiales. 2. Análisis de la
estructura atómica de los materiales,
sus propiedades, su resistencia a los
esfuerzos y su comportamiento a
distintas condiciones.

División Iberoamericana

México y América Central:
Thomson Learning
Séneca núm. 53
Col. Polanco
México, D. F., 11560
Tel. (52-55) 1500 6000
Fax (52-55) 5281 2858
editor@thomsonlearning.com.mx

América del Sur:
Thomson Learning
Calle 39 núm. 24-09
La Soledad
Bogotá, Colombia
Tel. (571) 340 9470
Fax (571) 340 9475
cliente@thomsonlearning.com.co

El Caribe:
Thomson Learning
598 Aldebarán
Altamira, San Juan
Puerto Rico
Zip Code: 00920
Tel. (787) 641 1112
Fax (787) 641 1119

España:
Thomson Learning
Calle Magallanes 25
28015 Madrid
España
Tel. 34 (0) 91 446 3350
Fax 34 (0) 91 445 6218
clientes@paraninfo.es

Cono Sur:
Buenos Aires, Argentina
thomson@thomsonlearning.com.ar

Esta obra se terminó de imprimir
en el mes de febrero del 2006
en los talleres de Digital Oriente S.A. de C.V.
México D.F.

Para Mary Sue and Tyler
—*Donald R. Askeland*

Para Janakibai Fulay, y
Prabhakar y Pratibha Fulay
—*Pradeep P. Phulé*

Resumen de contenido

PARTE 1 Estructura, arreglo y movimiento de los átomos

Capítulo 1 Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales 5

Capítulo 2 Estructura atómica 29

Capítulo 3 Arreglos atómicos y iónicos 67

Capítulo 4 Imperfecciones en los arreglos atómicos y iónicos 129

Capítulo 5 Movimientos de átomos y iones en los materiales 173

PARTE 2 Control de la microestructura y las propiedades mecánicas de los materiales

Capítulo 6 Propiedades y comportamiento mecánico 231

Capítulo 7 Endurecimiento por deformación y recocido 315

Capítulo 8 Principios de solidificación 357

Capítulo 9 Soluciones sólidas y equilibrio de fases 407

Capítulo 10 Endurecimiento por dispersión y diagramas de fases eutécticas 451

Capítulo 11 Endurecimiento por dispersión mediante transformaciones de fase y tratamiento térmico 497

PARTE 3 Materiales de ingeniería

Capítulo 12 Aleaciones ferrosas 543

Capítulo 13 Aleaciones no ferrosas 591

Capítulo 14 Materiales cerámicos 625

Capítulo 15 Polímeros 669

Capítulo 16 Materiales compuestos: trabajo en equipo y sinergia en los materiales 721

Capítulo 17 Materiales para la construcción 765

PARTE 4 Propiedades físicas de los materiales de ingeniería

Capítulo 18 Materiales electrónicos 789

Capítulo 19 Materiales magnéticos 849

Capítulo 20 Materiales fotónicos 883

Capítulo 21 Propiedades térmicas de los materiales 921

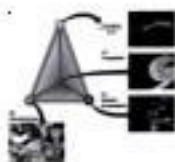
PARTE 5 Protección contra el deterioro y la falla de los materiales

Capítulo 22 Corrosión y desgaste 943

By Arkanosant...

Contenido

PARTE 1 Estructura, arreglo y movimiento de los átomos



Capítulo 1 Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales 5

	Introducción	5
1-1	¿Qué es la ciencia e ingeniería de los materiales?	6
1-2	Clasificación de los materiales	11
1-3	Clasificación funcional de los materiales	17
1-4	Clasificación de los materiales con base en su estructura	19
1-5	Efectos ambientales y de otra índole	20
1-6	Diseño y selección de materiales	22
RESUMEN		23
GLOSARIO		24
INFORMACIÓN ADICIONAL		26
PROBLEMAS		27



Capítulo 2 Estructura atómica 29

	Introducción	29
2-1	La estructura de los materiales: importancia tecnológica	30
2-2	La estructura del átomo	31
2-3	La estructura electrónica del átomo	37
2-4	La tabla periódica	41
2-5	Enlazamiento atómico	44
2-6	Energía de enlace y distancia interatómica	55
RESUMEN		59
GLOSARIO		60
INFORMACIÓN ADICIONAL		63
PROBLEMAS		63

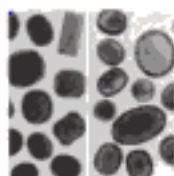


Capítulo 3 Arreglos atómicos y iónicos 67

	Introducción	67
3-1	Orden de corto alcance versus orden de largo alcance	68
3-2	Materiales amorfos: principios y aplicaciones tecnológicas	72
3-3	Redes, celdas unitarias, bases y estructuras cristalinas	76

3.4	Transformaciones alotrópicas o polimorfos	84
3.5	Puntos, direcciones y planos en la celda unitaria	87
3.6	Sitios intersticiales	97
3.7	Estructuras cristalinas de los materiales iónicos	100
3.8	Estructuras covalentes	106
3.9	Técnicas de difracción para el análisis de la estructura cristalina	110

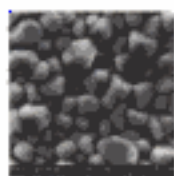
RESUMEN	116	■	GLOSARIO	117	■	INFORMACIÓN ADICIONAL	120	■	PROBLEMAS	121
-------------------------	---------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	-------------------	---------------------------------------	---------------------	-------------------	---------------------------	---------------------



[Capítulo 4](#) [Imperfecciones en los arreglos atómicos y iónicos](#) [129](#)

	Introducción	129
4.1	Defectos puntuales	130
4.2	Otros defectos puntuales	137
4.3	Dislocaciones	139
4.4	Observación de dislocaciones	146
4.5	Importancia de las dislocaciones	148
4.6	Ley de Schmid	149
4.7	Influencia de la estructura cristalina	151
4.8	Defectos superficiales	153
4.9	Importancia de los defectos	159

RESUMEN	162	■	GLOSARIO	163	■	INFORMACIÓN ADICIONAL	166	■	PROBLEMAS	167
-------------------------	---------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	-------------------	---------------------------------------	---------------------	-------------------	---------------------------	---------------------



[Capítulo 5](#) [Movimientos de átomos y iones en los materiales](#) [173](#)

	Introducción	173
5.1	Aplicaciones de la difusión	174
5.2	Estabilidad de átomos y iones	182
5.3	Mecanismos de la difusión	184
5.4	Energía de activación en la difusión	185
5.5	Velocidad de difusión [primera ley de Fick]	187
5.6	Factores que afectan la difusión	191
5.7	Permeabilidad de los polímeros	202
5.8	Perfil de composición [segunda ley de Fick]	203
5.9	Difusión y procesamiento de materiales	210

RESUMEN	215	■	GLOSARIO	216	■	INFORMACIÓN ADICIONAL	219	■	PROBLEMAS	220
-------------------------	---------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	-------------------	---------------------------------------	---------------------	-------------------	---------------------------	---------------------

PARTE 2 Control de la microestructura y las propiedades mecánicas de los materiales



Capítulo 6 Propiedades y comportamiento mecánico 231

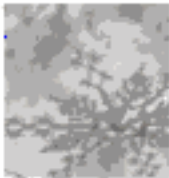
	<u>Introducción</u>	231
6-1	<u>Importancia tecnológica</u>	232
6-2	<u>Terminología de las propiedades mecánicas</u>	234
6-3	<u>El ensayo de tensión: uso del diagrama esfuerzo-deformación unitaria</u>	240
6-4	<u>Propiedades obtenidas en el ensayo de tensión</u>	245
6-5	<u>Esfuerzo real y deformación real</u>	252
6-6	<u>El ensayo de flexión para materiales frágiles</u>	254
6-7	<u>Dureza de los materiales</u>	257
6-8	<u>Efectos de la velocidad de deformación y comportamiento al impacto</u>	260
6-9	<u>Propiedades que se obtienen en el ensayo de impacto</u>	262
6-10	<u>Mecánica de la fractura</u>	264
6-11	<u>Importancia de la mecánica de fracturas</u>	269
6-12	<u>Propiedades microestructurales de la fractura en materiales metálicos</u>	272
6-13	<u>Propiedades microestructurales de las fracturas en cerámicos, vidrios y materiales compuestos</u>	276
6-14	<u>Estadística de Weibull para análisis de resistencia a la falla</u>	278
6-15	<u>Fatiga</u>	283
6-16	<u>Resultados del ensayo de fatiga</u>	287
6-17	<u>Aplicación de los ensayos de fatiga</u>	288
6-18	<u>Termofluencia, ruptura por esfuerzo y corrosión bajo esfuerzos</u>	292
6-19	<u>Evaluación del comportamiento de termofluencia</u>	294
6-20	<u>Uso de datos de termofluencia</u>	296
6-21	<u>Superplasticidad</u>	298
	BESUMEN	298
	■ GLOSARIO	299
	■ INFORMACIÓN ADICIONAL	304
	■ PROBLEMAS	304



Capítulo 7 Endurecimiento por deformación y recocido 315

	<u>Introducción</u>	315
7-1	<u>Relación entre el trabajo en frío y la curva esfuerzo-deformación unitaria</u>	316
7-2	<u>Mecanismos de endurecimiento por deformación</u>	322
7-3	<u>Propiedades en función del porcentaje de trabajo en frío</u>	324

7-4	Microestructura, endurecimiento por textura y esfuerzos residuales	326
7-5	Características del trabajo en frío	331
7-6	Las tres etapas del recocido	334
7-7	Control del recocido	337
7-8	Recocido y procesamiento de materiales	339
7-9	Trabajo en caliente	341
7-10	Formado superplástico	343
	RESUMEN	344
	■ GLOSARIO	345
	■ INFORMACIÓN ADICIONAL	347
	■ PROBLEMAS	348



Capítulo 8 [Principios de solidificación](#) 357

	Introducción	357
8-1	Importancia tecnológica	358
8-2	Nucleación	360
8-3	Aplicaciones de la nucleación controlada	364
8-4	Mecanismos de crecimiento	366
8-5	Tiempo de solidificación y tamaño de dendrita	368
8-6	Curvas de enfriamiento	373
8-7	Estructura de la pieza colada	374
8-8	Defectos de solidificación	376
8-9	Procesos de vaciado para fabricar componentes	381
8-10	Colada continua y vaciado de lingotes	383
8-11	Solidificación direccional [DS], crecimiento de monocristales y crecimiento epitaxial	387
8-12	Solidificación de polímeros y vidrios inorgánicos	390
8-13	Unión de materiales metálicos	391
	RESUMEN	393
	■ GLOSARIO	394
	■ INFORMACIÓN ADICIONAL	398
	■ PROBLEMAS	398



Capítulo 9 [Soluciones sólidas y equilibrio de fases](#) 407

	Introducción	407
9-1	Fases y diagrama de fases	408
9-2	Solubilidad y soluciones sólidas	415
9-3	Condiciones para la solubilidad ilimitada	419
9-4	Endurecimiento por solución sólida	421
9-5	Diagramas de fases isomorfo	423
9-6	Relación entre las propiedades y el diagrama de fases	432
9-7	Solidificación de aleaciones de solución sólida	434
9-8	Solidificación fuera de equilibrio y segregación	435
	RESUMEN	440
	■ GLOSARIO	441
	■ INFORMACIÓN ADICIONAL	443
	■ PROBLEMAS	443



Capítulo 10 Endurecimiento por dispersión y diagramas de fases eutécticas 451

	Introducción	451
10-1	Principios y ejemplos del endurecimiento por dispersión	452
10-2	Compuestos intermetálicos	453
10-3	Diagramas de fases que contienen reacciones entre tres fases	458
10-4	El diagrama de fases eutécticas	460
10-5	Resistencia de las aleaciones eutécticas	471
10-6	Eutécticos y procesamiento de materiales	477
10-7	Solidificación del sistema eutéctico en desequilibrio	480
10-8	Diagramas de fases ternarios	481
RESUMEN		483
■ GLOSARIO		484
■ INFORMACIÓN ADICIONAL		486
■ PROBLEMAS		487



Capítulo 11 Endurecimiento por dispersión mediante transformaciones de fase y tratamiento térmico 497

	Introducción	497
11-1	Nucleación y crecimiento en reacciones en estado sólido	498
11-2	Aleaciones endurecidas al exceder el límite de solubilidad	502
11-3	Endurecimiento por envejecimiento o por precipitación	505
11-4	Aplicaciones de las aleaciones endurecidas por envejecimiento	505
11-5	Evolución microestructural en el endurecimiento por envejecimiento o por precipitación	507
11-6	Efecto de la temperatura y del tiempo de envejecimiento	510
11-7	Requisitos para el endurecimiento por envejecimiento	511
11-8	Uso de aleaciones endurecibles por envejecimiento a altas temperaturas	511
11-9	La reacción eutectoide	512
11-10	Control de la reacción eutectoide	517
11-11	La reacción martensítica y el revenido	523
11-12	Las aleaciones con efecto de memoria de forma [SMA]	527
RESUMEN		529
■ GLOSARIO		530
■ INFORMACIÓN ADICIONAL		532
■ PROBLEMAS		533

PARTE 3 Materiales de ingeniería



Capítulo 12 Aleaciones ferrosas 543

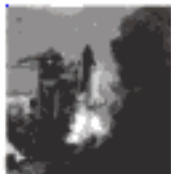
	Introducción	543
12-1	Designaciones y clasificación de los aceros	545

12-2	Tratamientos térmicos simples	549
12-3	Tratamientos térmicos isotérmicos	552
12-4	Tratamientos térmicos de templado y revenido	555
12-5	Efecto de los elementos de aleación	560
12-6	Aplicación de la templabilidad	563
12-7	Aceros especiales	566
12-8	Tratamientos superficiales	567
12-9	Soldabilidad del acero	569
12-10	Aceros inoxidables	571
12-11	Hierros fundidos	574
RESUMEN	580 ■ GLOSARIO	581 ■ INFORMACIÓN ADICIONAL
	584 ■ PROBLEMAS	584



Capítulo 13 Aleaciones no ferrosas 591

Introducción		591
13-1	Aleaciones de aluminio	592
13-2	Aleaciones de magnesio y de berilio	600
13-3	Aleaciones de cobre	602
13-4	Aleaciones de níquel y de cobalto	606
13-5	Aleaciones de titanio	610
13-6	Metales refractarios y preciosos	617
RESUMEN	618 ■ GLOSARIO	619 ■ INFORMACIÓN ADICIONAL
	619 ■ PROBLEMAS	620



Capítulo 14 Materiales cerámicos 625

Introducción		625
14-1	Aplicaciones de los materiales cerámicos	626
14-2	Propiedades de los materiales cerámicos	629
14-3	Síntesis de los polvos cerámicos	630
14-4	Procesamiento de los polvos	634
14-5	Características de los materiales cerámicos sinterizados	642
14-6	Vidrios inorgánicos	644
14-7	Procesos y aplicaciones de los vidrios	647
14-8	Materiales vitrocerámicos	651
14-9	Procesamiento y aplicaciones de productos de arcilla	653
14-10	Refractarios	655
14-11	Otros materiales cerámicos	657
RESUMEN	659 ■ GLOSARIO	660 ■ INFORMACIÓN ADICIONAL
	662 ■ PROBLEMAS	663

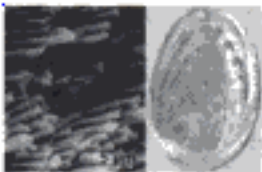


Capítulo 15 Polímeros 669

Introducción 669

- 15-1 Clasificación de los polímeros 670
- 15-2 Polimerización por adición 674
- 15-3 Polimerización por condensación 677
- 15-4 Grado de polimerización 679
- 15-5 Termoplásticos comunes 681
- 15-6 Relaciones estructura-propiedades en los termoplásticos 683
- 15-7 Efecto de la temperatura sobre los termoplásticos 687
- 15-8 Propiedades mecánicas de los termoplásticos 693
- 15-9 Elastómeros [hules] 698
- 15-10 Polímeros termofijos o termoestables 703
- 15-11 Adhesivos 706
- 15-12 Aditivos para los plásticos 707
- 15-13 Procesamiento y reciclaje de los polímeros 708

RESUMEN 712 ■ GLOSARIO 713 ■ INFORMACIÓN ADICIONAL 715 ■ PROBLEMAS 715



Capítulo 16 Materiales compuestos: trabajo en equipo y sinergia en los materiales 721

Introducción 721

- 16-1 Materiales compuestos endurecidos por dispersión 723
- 16-2 Materiales compuestos particulados 725
- 16-3 Materiales compuestos reforzados con fibras 730
- 16-4 Características de los materiales compuestos reforzados con fibras 735
- 16-5 Manufactura de fibras y de materiales compuestos 742
- 16-6 Sistemas reforzados con fibra y sus aplicaciones 746
- 16-7 Materiales compuestos laminares 753
- 16-8 Ejemplos y aplicaciones de materiales compuestos laminares 755
- 16-9 Estructuras tipo emparedado 756

RESUMEN 757 ■ GLOSARIO 758 ■ INFORMACIÓN ADICIONAL 760 ■ PROBLEMAS 760



Capítulo 17 Materiales para la construcción 765

Introducción 765

- 17-1 Estructura de la madera 766
- 17-2 Contenido de humedad y densidad de la madera 769
- 17-3 Propiedades mecánicas de la madera 770
- 17-4 Dilatación y contracción de la madera 773
- 17-5 Madera contrachapada o triplay 773
- 17-6 Materiales de concreto 774

17.7	Propiedades del concreto	776
17.8	Concreto reforzado y preesforzado	781
17.9	Asfalto	781
RESUMEN 782 ■ GLOSARIO 783 ■ INFORMACIÓN ADICIONAL 784 ■ PROBLEMAS 784		

PARTE 4 Propiedades físicas de los materiales de ingeniería



Capítulo 18 Materiales electrónicos 789

	Introducción	789
18-1	Ley de Ohm y conductividad eléctrica	791
18-2	Estructura de las bandas en sólidos	797
18-3	Conductividad de los metales y aleaciones	800
18-4	Superconductividad	804
18-5	Conductividad de otros materiales	809
18-6	Semiconductores	811
18-7	Aplicaciones de los semiconductores	819
18-8	Aislantes y sus propiedades dieléctricas	826
18-9	Polarización en los materiales dieléctricos	827
18-10	Electrostricción, piezoelectricidad, piroelectricidad y ferroelectricidad	833
RESUMEN 839 ■ GLOSARIO 840 ■ INFORMACIÓN ADICIONAL 842 ■ PROBLEMAS 843		



Capítulo 19 Materiales magnéticos 849

	Introducción	849
19-1	Clasificación de los materiales magnéticos	850
19-2	Dipolos y momentos magnéticos	850
19-3	Magnetización, permeabilidad y el campo magnético	852
19-4	Materiales diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, ferrimagnéticos y superparamagnéticos	856
19-5	Estructura del dominio y el ciclo de histéresis	859
19-6	La temperatura de Curie	861
19-7	Aplicaciones de los materiales magnéticos	863
19-8	Materiales magnéticos metálicos y cerámicos	869
RESUMEN 875 ■ GLOSARIO 876 ■ INFORMACIÓN ADICIONAL 877 ■ PROBLEMAS 878		

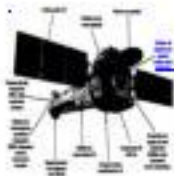


Capítulo 20 Materiales fotónicos 883

Introducción 883

- 20-1 El espectro electromagnético 884
- 20-2 Refracción, reflexión, absorción y transmisión 885
- 20-3 Absorción, transmisión o reflexión selectiva 898
- 20-4 Ejemplos y uso de los fenómenos de emisión 899
- 20-5 Sistemas de comunicaciones por fibras ópticas 911

BESUMEN 914 ■ GLOSARIO 914 ■ INFORMACIÓN ADICIONAL 915 ■ PROBLEMAS 916



Capítulo 21 Propiedades térmicas de los materiales 921

Introducción 921

- 21-1 Capacidad de calor y calor específico 922
- 21-2 Expansión térmica 925
- 21-3 Conductividad térmica 930
- 21-4 Choque térmico 934

BESUMEN 935 ■ GLOSARIO 936 ■ INFORMACIÓN ADICIONAL 936 ■ PROBLEMAS 937

PARTE 5

Protección contra el deterioro y la falla de los materiales



Capítulo 22 Corrosión y desgaste 943

Introducción 943

- 22-1 Corrosión química 944
- 22-2 Corrosión electroquímica 946
- 22-3 Potencial del electrodo en las celdas electroquímicas 949
- 22-4 La corriente de corrosión y la polarización 954
- 22-5 Tipos de corrosión electroquímica 954
- 22-6 Protección contra la corrosión electroquímica 959
- 22-7 Degradación microbiana y polímeros biodegradables 966
- 22-8 Oxidación y otras reacciones gaseosas 967
- 22-9 Desgaste y erosión 970

BESUMEN 972 ■ GLOSARIO 973 ■ INFORMACIÓN ADICIONAL 975 ■ PROBLEMAS 975

<u>Apéndice A: Propiedades seleccionadas de los metales</u>	<u>978</u>
Apéndice B: Radios atómicos y iónicos de elementos seleccionados	980
<u>Apéndice C: Configuración electrónica de cada uno de los elementos</u>	<u>982</u>
Respuestas a los problemas seleccionados	984
<u>Índice</u>	<u>989</u>

Prefacio

Esta cuarta edición de *Ciencia e ingeniería de los materiales* tiene dos objetivos principales. El primero continúa con la idea de las ediciones anteriores: dar a comprender la relación entre estructura, procesamiento y propiedades de los materiales (véase el capítulo 1). Las metas principales de un científico y un ingeniero en materiales son mejorar los materiales existentes e inventar o descubrir fenómenos que permitan desarrollar materiales, dispositivos y aplicaciones nuevos. Todos los ingenieros de todas las especialidades pueden beneficiarse con un conocimiento detallado de la ciencia de los materiales. Esta ciencia subyace en muchos avances tecnológicos relacionados con la energía, la información y el medio ambiente. Una comprensión básica de los materiales y de su aplicación no sólo hace mejor al ingeniero, sino también ayuda en el proceso de diseño **de cualquier dispositivo o aplicación que se considere**. En la actualidad, es importante que los ingenieros comprendan las restricciones del comportamiento de los materiales, para seleccionar el mejor para determinada aplicación. Creemos que también los ingenieros que comprenden detalladamente los conceptos básicos de estructura atómica y molecular, y que conocen qué propiedades de los materiales se prestan para que los procesos sean más eficientes y económicos, tomarán las decisiones adecuadas para desarrollar los mejores productos y aplicaciones.

El segundo objetivo de este texto es motivar a los estudiantes de ingeniería para que deseen estudiar y comprender la ciencia de materiales, usando los excitantes desarrollos actuales en el campo. Se ha dedicado un esfuerzo considerable para presentar aplicaciones interesantes y modernas en las explicaciones sobre las bases teóricas, para vincular la teoría con las aplicaciones en la realidad. La diversidad de aplicaciones y los usos únicos de los materiales se presentan en las secciones de *Ejemplo* de cada capítulo, para contribuir a ilustrar por qué un buen ingeniero necesita comprender con detalle y saber cómo aplicar los principios de la ciencia e ingeniería de los materiales. En las áreas de nanotecnología, tecnología de la información, tecnología de energía e ingeniería biomédica han ocurrido progresos considerables. En esta edición verá el lector muchos ejemplos que se relacionan en forma directa con estas áreas de la tecnología.

Audiencia y prerrequisitos

Este texto está dedicado a los estudiantes de ingeniería que hayan terminado cursos de química general, física, ingeniería y cálculo. La mayoría de los alumnos tomarán este curso cuando sean de primer ingreso o de los primeros grados, y se ha pulido cuidadosamente la presentación para adaptarla a ese público. Para facilitar la comprensión, se presenta una descripción breve de los conceptos clave de los cursos prerrequisito, para ayudar a que los estudiantes refresquen su memoria. El libro supone que los alumnos no han tomado alguno de los cursos prerrequisito para ingeniería: de estadística, dinámica o mecánica de materiales.

Creemos que al leer y usar este libro, los alumnos encontrarán que la ciencia e ingeniería de los materiales es en realidad muy interesante, y verán con claridad la importancia de lo que están aprendiendo. Hemos presentado muchos ejemplos de aplicaciones modernas de la ciencia e ingeniería de los materiales que tendrán impacto sobre la vida de los alumnos. Nuestro sentir es que, si los alumnos reconocen que muchas de las maravillas tecnológicas actuales dependen de la disponibilidad de los materiales diseñados, estarán más motivados y permanecerá su interés en el aprendizaje de la ciencia de los materiales y la ingeniería de los materiales.

Cambios en la cuarta edición

Esta cuarta edición de *Ciencia e ingeniería de los materiales* se ha revisado meticulosamente para incluir descripciones de los avances recientes en el campo, como son los nanomateriales y los sistemas microelectromecánicos (capítulo 1), microcircuitos eléctricos flexibles hechos de polímeros (capítulo 18), materiales inteligentes (capítulos 11 y 18), fibras ópticas (capítulos 2 y 20) y materiales electrónicos, magnéticos y fotónicos avanzados, sólo por mencionar unos cuantos. Cada capítulo presenta ejemplos de las últimas y sorprendentes aplicaciones en el mundo real.

Nuestro texto continúa dividido en cinco partes, como en las ediciones anteriores, y hemos combinado nuestras discusiones acerca de las fallas con las de las propiedades y comportamiento, para crear un capítulo 6 revisado. Se ha eliminado el capítulo 23 de la tercera edición, acerca de la falla. Con base en la retroalimentación de los usuarios, hemos decidido que la descripción de este tema se adapta mejor para presentarse con la descripción de las propiedades y las pruebas de los materiales. Esos temas se han integrado con los capítulos 6 y 22. Hemos ampliado y actualizado en forma minuciosa nuestras descripciones de los cerámicos (capítulo 14), los polímeros (capítulo 15), los materiales compuestos (capítulo 16), los materiales electrónicos (capítulo 18), los materiales magnéticos (capítulo 19) y los materiales fotónicos (capítulo 20), para que reflejen los desarrollos y las aplicaciones recientes. También hemos hecho un esfuerzo deliberado para integrar las aplicaciones de los conceptos fundamentales, y no sólo clasificarlas como cerámicos, metales y polímeros.

Novedades

Hemos agregado características nuevas y únicas en la cuarta edición:

En la página de este libro, dentro del sitio www.thomsonlearning.com.mx usted encontrará un conjunto de archivos con los siguientes elementos, que son apoyos para el curso de ciencia e ingeniería de materiales:

- * Una de las herramientas más útiles es una versión para estudiantes del paquete de aplicación CaRIne Crystallography™. Éste es un paquete computacional de ciencia de materiales diseñado para auxiliar a los estudiantes en la visualización de los conceptos de estructura molecular y atómica, así como el de las propiedades de los materiales. Sentimos que la inserción del paquete CaRIne será invaluable en la enseñanza de los conceptos relacionados con estructuras cristalinas.
- * Una colección de visualizaciones animadas en QuickTime™ desarrolladas por el Dr. John Russ (North Carolina State University) que abarca conceptos de la ciencia de materiales importantes como deformación de cristales, diagramas de fases, cizallamiento y enlace molecular.

Fotografías y leyendas al inicio de los capítulos Cada capítulo comienza con una fotografía y pie de foto que ilustra una aplicación interesante. De este modo se proporcionan informaciones adicionales, diseñadas para despertar la curiosidad del lector acerca del material que se presenta en ese capítulo.

Secciones "¿Alguna vez se preguntó...?" La foto en el inicio del capítulo está acompañada con una de estas secciones, las cuales tienen por objeto despertar el interés del lector, poner las cosas en perspectiva y proporcionar el marco de referencia de lo que aprenderá en el capítulo.

Introducciones de los capítulos Las introducciones de los capítulos proporcionan una descripción de la forma en que se presentará el material en ellos, y ofrecen información importante para conocimiento del alumno mientras lee el capítulo. Esta sección no es gratuita, porque el material del capítulo se desarrolla partiendo de estas descripciones preliminares.

Ejemplos Como se mencionó antes, se han integrado muchos ejemplos del mundo real, que acompañan las descripciones de los capítulos. Estos ejemplos cubren en forma específica consideraciones de diseño tales como temperatura de funcionamiento, presencia de materiales corrosivos, consideraciones económicas, reciclabilidad y restricciones ambientales. También se aplican los ejemplos a los materiales de teoría y a los cálculos numéricos, para reforzar la presentación posterior.

Resúmenes de capítulos Se han aumentado los resúmenes al final de los capítulos, y son más detallados que los de las ediciones anteriores.

Glosario Los términos del glosario al final de los capítulos se han detallado. Todos los términos del glosario que aparecen en el capítulo se imprimen en negritas la primera vez que aparecen en el texto. Esto permite tener una referencia fácil a las definiciones que se presentan en el glosario al final de cada capítulo.

Información adicional Al final de cada capítulo hemos proporcionado una lista de referencias. Los alumnos o los profesores pueden usar estas referencias para conocer más acerca de los temas del capítulo. No hemos citado en forma específica a sitios Web, ya que cambian con frecuencia y la mayoría de los usuarios encuentran fácilmente la información en Internet.

Problemas de final de capítulo Se han agregado más de 150 problemas de final de capítulo para que el alumno adquiera práctica en la aplicación de los principios presentados en el mismo. Hemos agregado más problemas de diseño y de cómputo, siendo el instructor el que decida si los asigna como requisitos o como material adicional a los créditos. Más adelante, los empleadores considerarán deseable tener mayores conocimientos de cómputo y habilidad con el uso de programas y bases de datos, y sentimos que los problemas de cómputo pueden ayudar a que los alumnos desarrollen esos conocimientos. El uso de las computadoras puede ser una consideración importante en el proceso de acreditación ABET. Consideramos que los problemas que aquí se sugieren también podrían ser útiles en este respecto.

Nuevas fotografías y micrografías Las ilustraciones se han cambiado por completo y se han agregado más de 50 fotografías y micrografías nuevas. Hay muchas fotografías nuevas que ilustran aplicaciones reales fascinantes. Muchas de las ilustraciones nuevas comunican los conceptos técnicos en una forma más clara.

Anexo a cuatro colores El anexo a colores muestra fotográficamente la relación entre la estructura de un material, su procesamiento y la forma en que pueden usarse sus propiedades en un producto final.

Tabla periódica Hemos presentado la tabla periódica en dos páginas en el capítulo 2, y hemos marcado las páginas en su orilla para tener una referencia rápida y fácil de este importante tema. Esta tabla periódica incluye información útil: número atómico, configuraciones electrónicas, punto de fusión, punto de ebullición, masa atómica, estados de oxidación, densidad y electronegatividad.

Respuestas a problemas seleccionados Las respuestas a los problemas seleccionados se presentan al final del libro, para ayudar al alumno a resolver los problemas de final de capítulo.

Apéndices e información en las cubiertas El apéndice A contiene una lista de algunas propiedades físicas de los metales; el apéndice B contiene los radios atómicos y iónicos de algunos elementos y el apéndice C presenta la configuración electrónica de cada uno de los elementos. Las cubiertas contienen tablas de conversión del SI y propiedades físicas seleccionadas de los elementos. Una de las cubiertas contiene una ilustración útil que ayuda a contestar la pregunta que hacen los alumnos con más frecuencia: "¿Qué es la ciencia e ingeniería de materiales?"

Descripción general por capítulo

La parte I introduce al alumno a la estructura atómica, los arreglos atómicos y los movimientos atómicos:

Capítulo 1. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales: Este capítulo presenta una introducción al estudio de la ciencia e ingeniería de los materiales mediante el tetraedro CIM (Ciencia e Ingeniería de los Materiales) para explicar las interrelaciones entre composición, estructura, síntesis, procesamiento y funcionamiento. El capítulo explica la clasificación (funcional y de estructura) de los materiales, al igual que el diseño y la selección del material. Estas bases de la ciencia e ingeniería de materiales se ilustran mediante varias aplicaciones en el mundo real.

Capítulo 2. Estructura atómica: El capítulo lleva al alumno a las bases de la estructura atómica y los mecanismos de enlace de un material. Se describen muchos ejemplos de la manera en que los enlaces afectan las propiedades de los materiales.

Capítulo 3. Arreglos atómicos y iónicos: En el capítulo se describen los ordenamientos atómicos y iónicos, incluyendo el orden a corto y a largo alcances; los retículos, las celdas unitarias, las estructuras cristalinas, los puntos, las direcciones y los planos. Este capítulo también describe los materiales amorfos, las transformaciones alotrópicas y polimórficas y las estructuras cristalinas de los compuestos con enlaces iónicos y covalentes.

Capítulo 4. Imperfecciones en los arreglos atómicos y iónicos: Aquí continúa la descripción de los arreglos atómicos y iónicos con descripciones de imperfecciones del retículo, como por ejemplo, defectos puntuales, dislocaciones, estructuras cristalinas y defectos de superficie.

Capítulo 5. Movimientos de átomos y iones en los materiales: El capítulo cubre los conceptos básicos de difusión: el movimiento de átomos y iones. En la descripción de la difusión, se incluyen aplicaciones, mecanismos, energía de activación, velocidad y factores que afectan a la difusión. También incluye la descripción de la primera y la segunda leyes de Fick y la permeabilidad de los polímeros.

La parte II introduce los conceptos de propiedades mecánicas de los materiales y el control de la microestructura:

Capítulo 6. Propiedades y comportamiento mecánico: Introduce al estudiante en las propiedades y el comportamiento de diversos materiales, con el examen de los métodos de prueba y las razones de la falla. Entre las descripciones, se incluyen la terminología de las propiedades mecánicas, la prueba de tensión, la prueba de flexión, el esfuerzo-deformación verdadero, la dureza, el impacto, la mecánica de fractura, la estadística de Weibull, la fatiga, la termofluencia, la ruptura por esfuerzo y la corrosión bajo esfuerzo.

Capítulo 7. Endurecimiento por deformación y recocido: Este capítulo explica los conceptos de endurecimiento por deformación y recocido, con descripciones de trabajo en frío, la curva esfuerzo-deformación, los mecanismos de endurecimiento por deformación, el reforzamiento por el desarrollo de textura, las tres etapas del recocido, el control del recocido, el trabajo en caliente y el formado superplástico.

Capítulo 8. Principios de solidificación: Explica el concepto de la solidificación. Las descripciones incluyen la nucleación, los mecanismos de crecimiento, el tiempo y el tamaño de las dendritas, las curvas de enfriamiento, la estructura de la pieza colada, defectos, procesos de fundición, colada continua y de lingotes, solidificación direccional, crecimiento de monocristales, crecimiento epitaxial, solidificación de polímeros y vidrios y la unión de materiales metálicos.

Capítulo 9. Soluciones sólidas y equilibrio de fases: Este capítulo introduce al estudiante en los importantes conceptos de diagramas de fase y soluciones sólidas. Se presentan descripciones de fases, diagramas de fase unario, solubilidad y soluciones sólidas, condiciones para la solubilidad sólida ilimitada, reforzamiento por solución sólida, diagramas de fases isomorfas, propiedades y diagramas de fases, solidificación de aleaciones por solución sólida, solidificación fuera de equilibrio y segregación. Entre los ejemplos, se encuentran las descripciones de diagramas de fases de sistemas metálicos, cerámicos y poliméricos.

Capítulo 10. Endurecimiento por dispersión y diagrama de fases eutécticas: En este capítulo continúa la descripción de los diagramas de fase, para presentar y describir el reforzamiento por dispersión, los compuestos intermetálicos, las reacciones en tres fases, el diagrama de fases eutéctico, las aleaciones eutécticas, los materiales eutécticos y su procesamiento, solidificación fuera de equilibrio y los diagramas de fases ternarios.

Capítulo 11. Endurecimiento por dispersión mediante transformaciones de fase y tratamiento térmico: Continúa la descripción de reforzamiento por dispersión mediante transformación de fases; también incluye una descripción de tratamiento térmico. Las descripciones abarcan nucleación y crecimiento en reacciones en estado sólido, endurecimiento por precipitación y envejecimiento, efectos de la temperatura y del tiempo de envejecimiento, reacciones eutectoides, la transformación martensítica y las aleaciones con memoria de forma.

La parte III introduce al alumno en la ingeniería de materiales:

Capítulo 12. Aleaciones ferrosas: Presenta las designaciones, clasificaciones y tratamientos térmicos que se usan con los aceros, hierros colados y aleaciones metálicas. También presenta la síntesis y el procesamiento de esos materiales.

Capítulo 13. Aleaciones no ferrosas: Presenta las designaciones, clasificaciones y tratamientos de las aleaciones no ferrosas.

Capítulo 14. Materiales cerámicos: Este capítulo introduce al estudiante en las aplicaciones, propiedades, síntesis y procesamiento de materiales cerámicos avanzados; también explica los conceptos relacionados con síntesis y procesamiento de polvos.

Capítulo 15. Polímeros: Presenta al alumno las clasificaciones, estructura, propiedades mecánicas, técnicas de procesamiento y reciclabilidad de los polímeros. Hay varios ejemplos que ilustran las aplicaciones de los plásticos diseñados.

Capítulo 16. Materiales compuestos: trabajo en equipo y sinergia en los materiales: Explica los conceptos de materiales compuestos reforzados por dispersión, con partículas, con fibra y laminados.

Capítulo 17. Materiales para la construcción: Presenta las propiedades básicas y el comportamiento de materiales de construcción, como madera, concreto y asfalto.

La parte IV introduce al estudiante en las propiedades físicas de los materiales de ingeniería:

Capítulo 18. Materiales electrónicos: Este capítulo introduce al estudiante en el comportamiento y las propiedades eléctricas y la manera de aplicarlos a la ciencia de materiales. Entre las descripciones, se encuentran las de la ley de Ohm y la conductividad eléctrica; estructuras de bandas de los sólidos; conductividad de metales y aleaciones; superconductividad; conductividad en otros materiales, como plásticos, semiconductores y aislantes; propiedades dieléctricas; electrostricción; piezoelectricidad; ferroelectricidad y piroelectricidad.

Capítulo 19. Materiales magnéticos: Este capítulo presenta los conceptos de magnetismo en los materiales y sus clasificaciones. Entre las explicaciones, están las de dipolos y momentos magnéticos, magnetización, permeabilidad, materiales diamagnéticos, paramagnéticos, ferrimagnéticos, ferromagnéticos y superparamagnéticos; la estructura de dominios y el ciclo de histéresis, la temperatura de Curie y los materiales magnéticos metálicos y cerámicos. También describe las aplicaciones de los materiales magnéticamente duros y suaves.

Capítulo 20. Materiales fotónicos: En este capítulo, el alumno conoce el comportamiento y las propiedades de los materiales fotónicos y la forma de usarlos en la industria, incluyendo los sistemas de comunicaciones por fibra óptica.

Capítulo 21. Propiedades térmicas de los materiales: Este capítulo describe las propiedades térmicas de los materiales, incluyendo capacidad calorífica, calor específico, dilatación térmica, conductividad térmica y choque térmico.

La parte V contiene una descripción de la protección contra el deterioro y la falla de los materiales:

Capítulo 22. Corrosión y desgaste: Cubre los temas de corrosión y desgaste. Las descripciones incluyen la corrosión química, corrosión electroquímica, degradación microbiana, polímeros biodegradables, oxidación, reacciones con gases, desgaste y erosión. También describe estrategias para evitar la corrosión.

Estrategias de enseñanza con el libro

Reconocemos que todo el material que aquí se presenta no puede o no debe ser cubierto en un solo curso semestral normal. Sin embargo, al seleccionar los temas adecuados, el profesor puede destacar los materiales que desee (metales, aleaciones, cerámicas, polímeros, materiales compuestos, etc.), así como proporcionar una perspectiva de los materiales, o concentrarse

Acerca de los autores



Donald R. Askeland es un distinguido profesor emérito de Ingeniería metalúrgica en la Universidad de Missouri, Rolla. Recibió sus grados en la Thayer School of Engineering en el Dartmouth College y en la Universidad de Michigan, antes de ingresar a la facultad de la Universidad de Missouri, Rolla, en 1970. El Dr. Askeland enseñó en varios cursos de Ingeniería de materiales y de manufactura a estudiantes de diversos planes de estudio de ingeniería y ciencias. Recibió varios premios a la excelencia en la enseñanza y por asesorías en la UMR. Se desempeñó como Profesor Clave en la Foundry Educational Foundation y recibió varios premios por sus servicios en esa organización. Su enseñanza e investigaciones se dirigieron principalmente a la fundición y unión de metales, en particular la fundición en modelo de espuma perdida, que originaron más de 50 publicaciones y varios premios por servicios y mejores trabajos, por parte de la American Foundry Society.



Pradeep P. Phulé es profesor de Ciencia e ingeniería de materiales en la Universidad de Pittsburgh. Ingresó a esa universidad en 1989, fue promovido a Profesor asociado en 1994, y después a Profesor titular en 1999. El Dr. Phulé recibió un doctorado, Ph. D., en Ciencia e ingeniería de materiales en la Universidad de Arizona (1989) y un B. Tech (1983) y M. Tech (1984) en Ingeniería metalúrgica en el Indian Institute of Technology de Bombay (Mumbai), India.

Es autor de cerca de 60 publicaciones y se le otorgaron dos patentes en Estados Unidos. Ha recibido premios de investigación de la Fundación Alcoa y de la Fundación Ford.

Es un notable profesor y educador y, en fecha reciente, apareció en la lista de Faculty Honor Roll de la Universidad de Pittsburgh (2001) por sus destacados servicios y asesorías. De 1992 a 1999, fue el miembro del William Kepler Whiteford Faculty en la Universidad de Pittsburgh. De agosto a diciembre de 2002, el Dr. Phulé fue científico visitante en el Laboratorio Ford de Investigación Científica, en Dearborn, MI.

Los campos principales de investigación del Dr. Phulé son síntesis y procesamiento químicos de cerámicas, cerámicas electrónicas y materiales magnéticos, desarrollo de materiales y sistemas inteligentes. Parte de la tecnología MR de fluidos que ha desarrollado el Dr. Phulé se está transfiriendo a la industria. Fue el vicepresidente del Ceramic Educational Council (2001-2002) y miembro del Comité de programa para la División Electrónica de la American Ceramic Society, desde 1996.

También ha sido editor asociado del *Journal of the American Ceramic Society* (1994-2000). Principal organizador de simposios sobre cerámicos para procesamiento sol-gel, comunicaciones inalámbricas y estructuras y sensores inteligentes. En 2002, fue elegido miembro de la American Ceramic Society. Las investigaciones del Dr. Phulé han sido respaldadas por la National Science Foundation (NSF) y por muchas otras organizaciones.

Tenemos una deuda especial con nuestros revisores, que nos han acompañado en todas las etapas del manuscrito y galeras: la profesora Susan James, de Colorado State University y el profesor Norman E. Dowling, de Virginia Tech. Su intenso trabajo, dedicación y perspectivas nos ayudaron a crear este texto de calidad. También deseamos reconocer a Richard McAfee y al Dr. Ian Nettlehip, de la Universidad de Pittsburgh. Gracias también al Dr. Cyrille Boudias y al Dr. Daniel Monceau, autores del programa CaRIne.

Nuestro agradecimiento muy especial a cada persona de Brooks/Cole Publishing Company, por sus ánimos, conocimientos y paciencia hasta que este libro rindió frutos: Valerie Boyajian, Mary Vezilich, Tom Ziolkowski y Vernon Boes.

Deseamos agradecer en especial a tres personas, por sus diligentes esfuerzos: muchas gracias a Bill Stenquist, nuestro editor, quien estableció el tono de excelencia y proporcionó la visión, conocimientos y liderazgo para crear un producto de tal calidad; a Rose Kernan, nuestra editora de desarrollo y producción, quien pasó largas horas mejorando nuestra prosa y produciendo este texto de calidad, desde las primeras páginas del manuscrito hasta llegar al producto final, ya encuadernado; y al Dr. Deepa Godbole, de la Universidad de Pittsburgh, cuyos valientes esfuerzos, trabajo intenso y dedicación nunca podremos pagar.

Pradeep Phulé agradece de manera especial a su esposa, la Dra. Jyotsna Phulé, y a sus hijos, Aarohee y Suyash, por su paciencia, comprensión y ánimos. También las debidas gracias al profesor S.H. Risbud, de la Universidad de California en Davis, por su asesoría y ánimos, así como a todos nuestros colegas que nos proporcionaron muchas ilustraciones útiles.

Donald R. Askeland
Universidad de Missouri, Rolla, Emérito

Pradeep P. Phulé
Universidad de Pittsburgh

en el comportamiento o enfocar las propiedades físicas. Además, el libro es una referencia útil para el alumno en sus cursos posteriores de manufactura, diseño y selección de materiales. Para los alumnos que se especialicen en la ciencia e ingeniería de los materiales, o en campos muy relacionados, se pueden exponer con mayor detalle las secciones relacionadas con la síntesis y el procesamiento.

Complementos

Este libro cuenta con una serie de complementos para el profesor, los cuales están en inglés y sólo se proporcionan a los docentes que adopten la presente obra como texto para sus cursos. Para mayor información, favor de comunicarse con las oficinas de nuestros representantes o a los siguientes correos electrónicos:

- **Thomson México y Centroamérica:** clientes@thomsonlearning.com.mx.
- **Thomson América del Sur:** clithomson@andinet.com
- **Thomson Caribe:** amy.reyes@thomsonlearning.com

Reconocimientos

Se necesita un equipo de muchas personas, así como trabajo intenso, para crear un libro de texto de buena calidad. Estamos en deuda con todas las personas que nos ayudaron, animaron y criticaron en forma constructiva haciendo posible la preparación de esta cuarta edición.

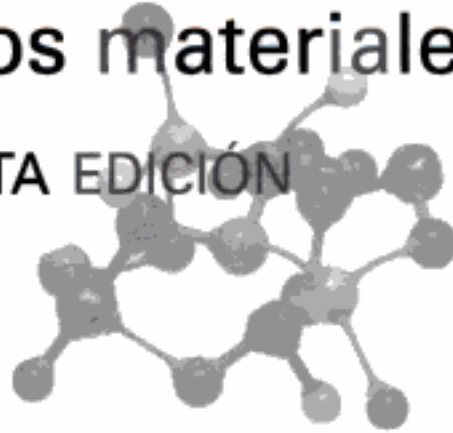
Primero, deseamos reconocer a los numerosos profesores que han leído y usado el texto, habiendo proporcionado una retroalimentación útil en nuestra encuesta inicial:

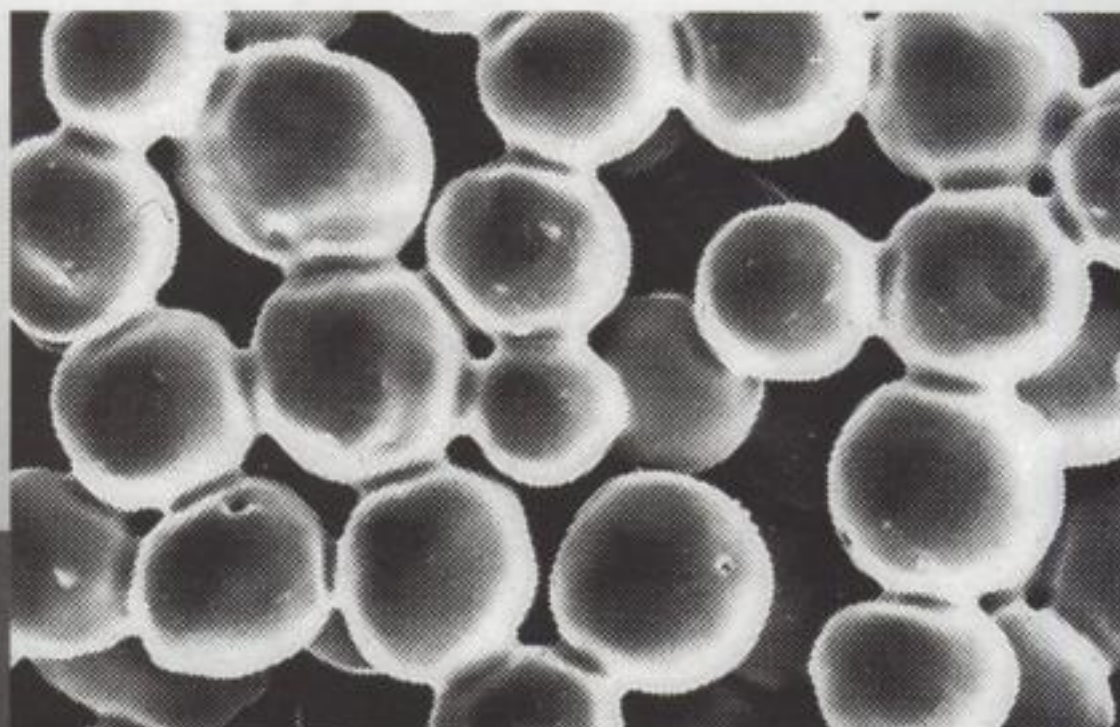
C. Maurice Balik, North Carolina State University
Brian Cousins, University of Tasmania
Arthur F. Diaz, San Jose State University
Richard S. Harmer, University of Dayton
Prashant N. Kumta, Carnegie Mellon University
Rafael Manory, Royal Melbourne Institute of Technogy
Sharon Nightingale, University of Wollongong, Australia
Christopher K. Ober, Cornell University
David Poirier, University of Arizona
Ramurthy Prabhakaran, Old Dominion University
Lew Rabenberg, The University of Texas at Austin
Wayne Reitz, North Dakota State University
John Schlup, Kansas State University
Robert L. Snyder, Rochester Institute of Technology

Las personas siguientes revisaron los capítulos individuales y nos proporcionaron indicaciones específicas: Harvey Abramowitz, Purdue University en Calumet; Arthur F. Diaz, San Jose State University; Hassan M. Rejali, California State Polytechnic University, Pomona; Judy Schneider, Mississippi State University y Supapan Seraphin, University of Arizona.

Ciencia e ingeniería de los materiales

CUARTA EDICIÓN





La consolidación de partículas de polvos es un método frecuente para fabricar materiales metálicos, cerámicos y compuestos. La difusión de los átomos hacia los puntos de contacto entre las partículas, que en este caso son polvos de cobre esféricos, durante la sinterización, hace que las partículas se peguen. La sinterización y la difusión continuas hacen que los poros entre las partículas finalmente desaparezcan. (Tomado de "Metals Handbook", vol. 9, *Metallography and Microstructure* (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073.)

PART E 1

CAPÍTULO 1

Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales

CAPÍTULO 2

Estructura atómica

CAPÍTULO 3

Arreglos atómicos y iónicos

CAPÍTULO 4

Imperfecciones en los arreglos atómicos y iónicos

CAPÍTULO 5

Movimientos de átomos y de iones en los materiales

Estructura, arreglo y movimiento de los átomos

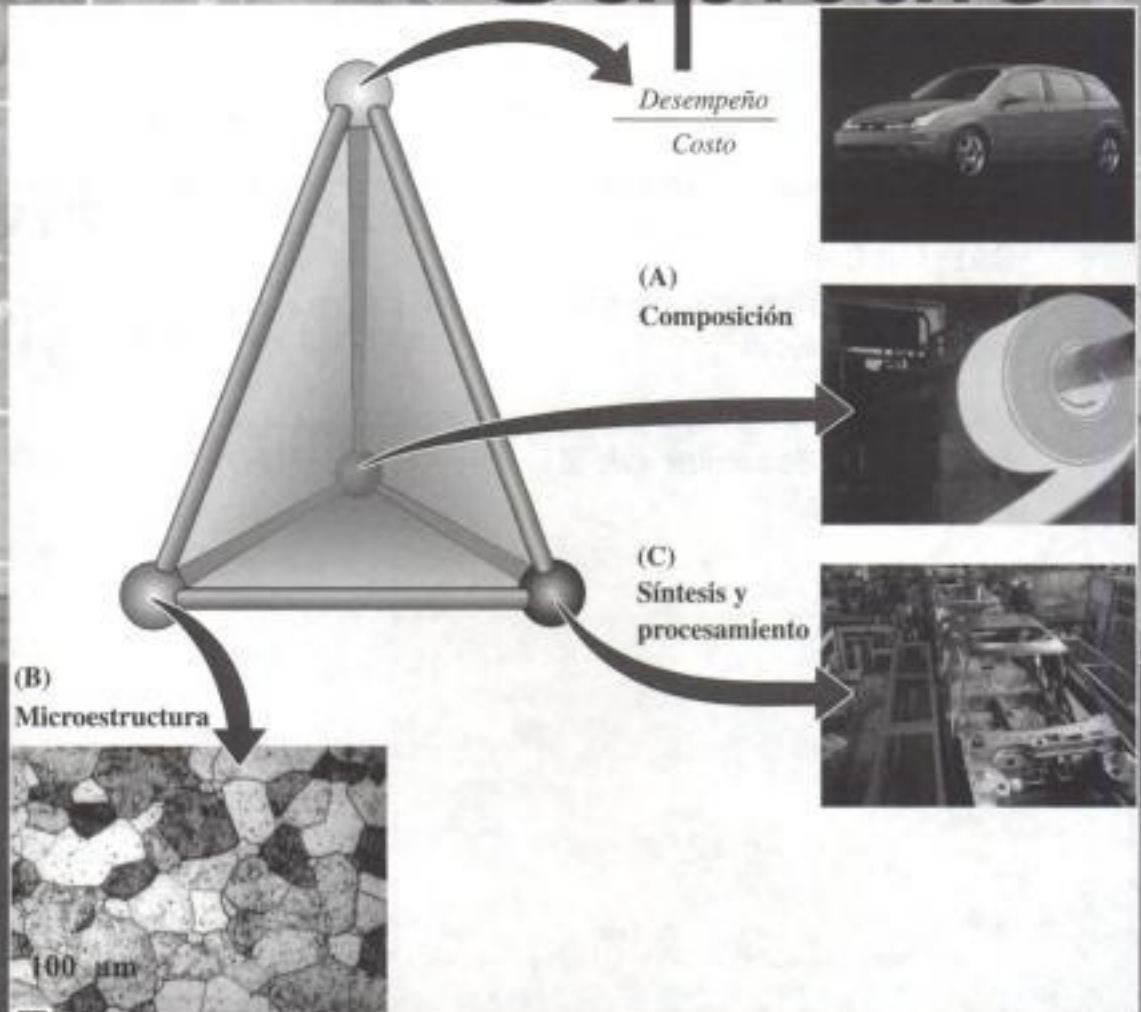
Los materiales se clasifican en varios grupos principales: metales, cerámicos, polímeros, semiconductores y materiales compuestos. El comportamiento de los materiales de cada uno de esos grupos se determina por su estructura. La estructura electrónica de un átomo determina la naturaleza del enlace atómico, lo cual contribuye a gobernar las propiedades mecánicas y físicas de ese material.

El arreglo de los átomos para formar una estructura cristalina o amorfa influye también en las propiedades de los materiales. Las imperfecciones en el arreglo atómico pueden desempeñar un papel fundamental en nuestro conocimiento de la deformación, las propiedades mecánicas y otras propiedades.

Por último, el movimiento de los átomos, llamado difusión, es importante en muchos tratamientos térmicos y procesos de manufactura, al igual que para determinar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales.

En los siguientes capítulos se describe el concepto estructura-propiedad-procesamiento, para controlar el comportamiento de los materiales y examinar los papeles de la estructura atómica, el arreglo atómico, las imperfecciones y el movimiento de los átomos. Esta revisión proporciona los cimientos necesarios para comprender la estructura y el comportamiento de los materiales diseñados que se describen más adelante.

Capítulo



Las metas principales de un científico y un ingeniero en materiales son: 1) mejorar los materiales existentes y 2) inventar o descubrir fenómenos, materiales, dispositivos y aplicaciones nuevas. Los grandes avances en el campo de la ciencia e ingeniería de materiales se aplican a muchos otros campos de estudio, como por ejemplo la ingeniería biomédica, física, química, ingeniería ambiental y tecnología de la información. El tetraedro de la ciencia e ingeniería de los materiales que vemos aquí representa el corazón y el alma de este campo.[1] Como se ve en el diagrama, el objetivo principal de un científico y un ingeniero en materiales es desarrollar materiales o dispositivos que tengan la máxima eficiencia para determinada aplicación. En la mayoría de los casos, la relación de desempeño a costo, contrario al desempeño solamente, es de suma importancia. Este concepto se muestra como el ápice del tetraedro y los tres vértices representan A) la composición, B) la microestructura y C) la síntesis y el procesamiento de los materiales. Todos ellos están interconectados y en último término afectan la relación de desempeño a costo de un material o dispositivo. La micrografía adjunta muestra la microestructura del acero inoxidable.

Para los científicos y los ingenieros en materiales, estos son como la paleta de colores para un artista. Así como un artista puede crear distintas pinturas con diferentes colores, los científicos en materiales crean y mejoran con diversos materiales usando distintos elementos de la tabla periódica y diferentes síntesis y rutas de procesamiento. (Imagen del automóvil cortesía de Ford Motor Company. Imagen de la fabricación del acero cortesía de Donovan Reese/PhotoDisc. Imagen del chasis del automóvil cortesía de Digital Vision/Getty Images. Micrografía cortesía del Dr. A. J. Deardo, Dr. M. Hula y Dr. J. García.)

Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales

¿Alguna vez se preguntó...

- ...qué estudian los científicos e ingenieros en los materiales?
- ...cómo se puede procesar la lámina de acero para producir el material de alta resistencia, ligero, que absorbe energía y maleable con el que se fabrica el chasis de un automóvil?
- ...si se pueden fabricar circuitos electrónicos flexibles y ligeros usando plásticos?
- ...qué es un "material inteligente"?

En este capítulo describiremos primero el campo de la ciencia e ingeniería de los materiales con diversos ejemplos del mundo real. Después presentaremos una introducción a la clasificación de los materiales. Aunque la mayoría de los programas de ingeniería piden que los alumnos tomen un curso de ciencia de los materiales, el lector debe considerar que su estudio en este

campo es más que sólo un requisito. Un conocimiento detallado de la ciencia e ingeniería de los materiales le permitirá ser mejor ingeniero y diseñador. La ciencia de materiales es básica en todos los progresos tecnológicos, y la comprensión de los fundamentos y las aplicaciones de los materiales no sólo le permitirán ser mejor ingeniero, sino que le ayudarán durante el proceso

de diseño. Para ser buen ingeniero, uno debe aprender qué materiales serán adecuados para su empleo en distintas aplicaciones. El aspecto más importante de los materiales es que son los medios; los materiales hacen que ocurran cosas. Por ejemplo, en la historia de la civilización, los materiales como la piedra, el bronce y el hierro desempeñaron un papel clave en el desarrollo de la humanidad.[2] En el acelerado mundo actual, el descubrimiento de los monocristales de silicio y la comprensión de sus propiedades ha hecho posible la era de la información.

En este capítulo, y en todo el libro, describiremos ejemplos motivadores de aplicaciones de

materiales diseñados en el mundo real. La diversidad de las aplicaciones y los usos únicos de los materiales ilustran por qué un buen ingeniero necesita comprender con detalle, y saber cómo aplicar, los principios de la ciencia e ingeniería de los materiales. En cada capítulo comenzaremos con una sección titulada ¿Alguna vez se preguntó ...? Estas preguntas se diseñaron para despertar la curiosidad del lector, para poner las cosas en perspectiva y para crear un marco de lo que se aprenderá en el capítulo.

1-1

¿Qué es la ciencia e ingeniería de los materiales?

La ciencia e ingeniería de los materiales es un campo interdisciplinario que se ocupa de inventar nuevos materiales y mejorar los ya conocidos, mediante el desarrollo de un conocimiento más profundo de las relaciones entre microestructura, composición, síntesis y procesamiento. El término **composición** indica la constitución química de un material. El término **estructura** significa una descripción del arreglo atómico, visto con distintos grados de detalle. Los científicos y los ingenieros en materiales no sólo tienen que ver con el desarrollo de materiales, sino también con la **síntesis** y el **procesamiento** de materiales y con los procesos de fabricación correspondientes a la producción de los componentes. El término **síntesis** indica la manera de fabricar los materiales a partir de elementos naturales o hechos por el hombre. El término **procesamiento** indica el modo en que se conforman los materiales en componentes útiles y para causar cambios en las propiedades de distintos materiales. Una de las funciones más importantes de los científicos e ingenieros en materiales es establecer las relaciones entre las propiedades y el funcionamiento de un material o de un dispositivo, así como la microestructura, la composición y la forma en que el material se sintetizó y procesó. En la **ciencia de materiales** se subrayan las relaciones subyacentes entre la síntesis y el procesamiento, la estructura y las propiedades de los materiales. En la **ingeniería de materiales** el enfoque es hacia cómo convertir o transformar los materiales en dispositivos o estructuras útiles.

Uno de los aspectos más fascinantes de la ciencia de materiales es la investigación de la estructura de un material. La estructura de los materiales tiene una influencia profunda en muchas de sus propiedades ¡aun cuando no cambie la composición general! Por ejemplo, si se toma un alambre de cobre puro y se dobla en forma repetida, el alambre no sólo se endurece ¡sino también se vuelve cada vez más frágil! Al final, el alambre de cobre puro se vuelve tan duro y frágil ¡que se rompe! La resistencia eléctrica del alambre también aumenta al doblarlo en forma repetida. En este ejemplo sencillo, obsérvese que no se cambió la composición del material, es decir, su constitución química. Los cambios en las propiedades del material se deben a un cambio en su estructura interna. Si se examina el alambre después de doblarlo se verá igual que antes; sin embargo, su estructura ha cambiado a una escala muy

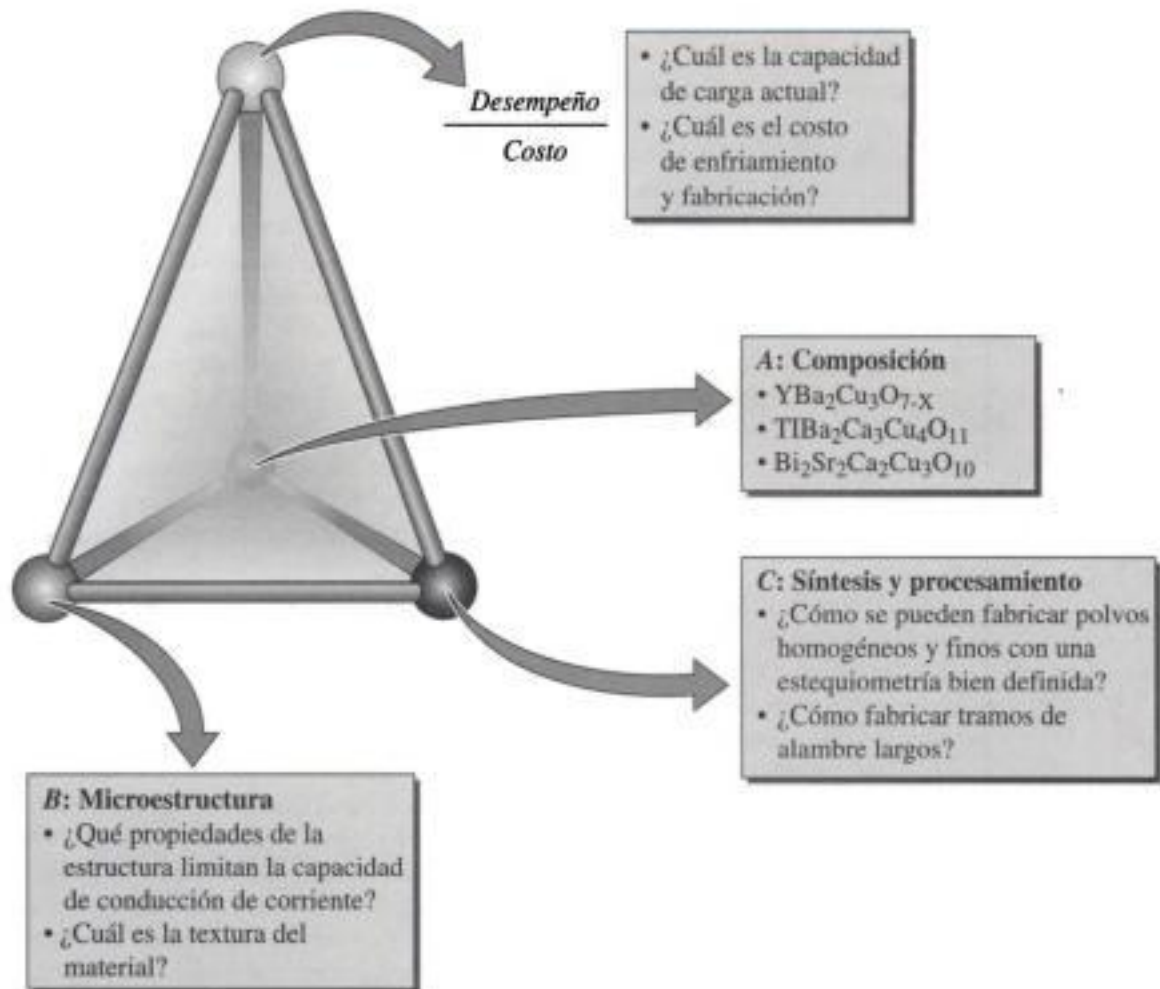


Figura 1-1 Aplicación del tetraedro de la ciencia e ingeniería de los materiales a los superconductores cerámicos. Obsérvese que la microestructura y la síntesis, y el procesamiento y la composición se interconectan entre sí y afectan la relación entre desempeño y costo.

pequeña o microscópica. A la estructura en esta escala microscópica se le llama **microestructura**. Si se puede comprender lo que cambió microscópicamente, se comenzará a descubrir formas para controlar las propiedades del material.

Veamos, con una perspectiva todavía mejor, el tetraedro de la ciencia e ingeniería de los materiales que se presentó en la página inicial del capítulo, examinando un producto de muestra: superconductores cerámicos inventados en 1986 (Fig. 1-1). El lector sabe que los materiales cerámicos no suelen conducir la electricidad. Los científicos encontraron por casualidad que ciertos compuestos cerámicos a base de óxidos de itrio, bario y cobre (llamados *YBCO*) en realidad pueden conducir la corriente eléctrica, sin ofrecerle resistencia, bajo ciertas condiciones. Con base en lo que entonces se conocía de los superconductores metálicos y las propiedades eléctricas de los cerámicos, no se consideraba que el comportamiento superconductor de éstos tuviera grandes posibilidades. Así, en este caso, el primer paso fue el *descubrimiento* del comportamiento superconductor de los materiales cerámicos. Una de las limitaciones que se descubrieron fue que esos materiales sólo pueden superconducir a bajas temperaturas (<150 K).

El siguiente paso fue determinar cómo mejorar esos materiales. Por "mejorar" se entiende la forma como se puede conservar el comportamiento superconductor en esos materiales, a temperaturas cada vez mayores, o cómo se puede transportar una gran cantidad de corriente a una gran distancia. Esto implica hacer estudios cuidadosos de procesamiento y propiedades estructurales. Los científicos en materiales deseaban saber cómo afecta la composición y la microestructura (el arreglo de la estructura atómica, etc.) al comportamiento superconductor; también deseaban saber si existían otros compuestos que presentaran una superconductividad similar. Mediante experimentos, los científicos desarrollaron la *síntesis* controlada de polvos ultrafinos con los cuales crear un material cerámico superconductor.

Desde una perspectiva de *ingeniería de materiales*, se desea saber si se pueden fabricar motores, imanes muy poderosos (que se pudieran usar, por ejemplo, para obtener imágenes de resonancia magnética), alambres de superconductores cerámicos que se usen en aplicaciones electrónicas o dispositivos microelectrónicos diminutos. Digamos que, en la aplicación de transmisión de energía eléctrica, se desea conocer, en último término, si se pueden fabricar tramos largos, fiables y reproducibles, de alambres superconductores mejores que los actuales alambres de cobre y de aluminio. ¿Se pueden producir esos alambres en forma económica?

El siguiente desafío fue fabricar tramos largos de alambres superconductores cerámicos. Estos superconductores son frágiles, por lo que era todo un reto fabricar tramos largos de alambre. Entonces debieron desarrollarse las técnicas de *procesamiento de materiales* para crear esos nuevos alambres. Se encontraron buenas soluciones mediante prueba y error. Una forma eficaz de crear estos alambres superconductores fue llenar tubos huecos de plata con polvos de cerámica superconductora, para después trefilarlos.

Aunque el descubrimiento de los superconductores cerámicos sí causó gran expectativa, la ruta de la conversión de ese descubrimiento en productos útiles ha encontrado muchos desafíos relacionados con la síntesis y el procesamiento de esos materiales.[3-6] En fecha reciente se ha observado la superconductividad en un compuesto llamado diboruro de magnesio (MgB_2). Este compuesto parece no tener las limitaciones de algunos de los demás superconductores cerámicos usados antes, pero se necesitarán más pruebas y desarrollos para fabricar este material en forma económica.[7]

A veces se califican como *revolucionarios* los descubrimientos de nuevos materiales, fenómenos o dispositivos. Hoy, al ver hacia atrás, se considera revolucionario el descubrimiento del transistor de silicio que se usa en los chips de computadora. Por otra parte, los materiales que han evolucionado durante cierto tiempo pueden tener la misma importancia; a esos materiales se les llama *evolucionarios*. Muchas aleaciones basadas en hierro, cobre y elementos parecidos son ejemplos de materiales evolucionarios. Naturalmente, es importante reconocer que los que hoy se consideran materiales evolucionarios, hace muchos años fueron avances revolucionarios. No es raro que primero se descubran materiales o fenómenos y después de muchos años aparezcan en el mercado los productos o procesos. La transición del desarrollo de materiales o procesos nuevos, hasta las aplicaciones comerciales o industriales útiles, puede ser lenta y difícil.[8]

Examinemos otro ejemplo de la aplicación del tetraedro de la ciencia e ingeniería de los materiales que se presentó en la página inicial. Veamos los *aceros laminados* que se usan en la fabricación del chasis de automóvil en la figura 1-2. Los aceros, como sabe el lector, se han usado en la manufactura durante más de cien años, pero es posible que existieran en una forma primitiva durante la Edad de Hierro, hace miles de años.[2,3] En la manufactura del chasis de automóvil se necesita un material que posea una resistencia extremadamente alta, pero que fácilmente se conforme a contornos aerodinámicos. Otra consideración es la de la eficiencia de la gasolina, por lo que la lámina de acero también debe ser delgada y ligera. Los aceros laminados también deben ser capaces de absorber cantidades importantes de energía en un choque, y aumentar así la seguridad del vehículo. Estos últimos son requisitos un tanto contradictorios.

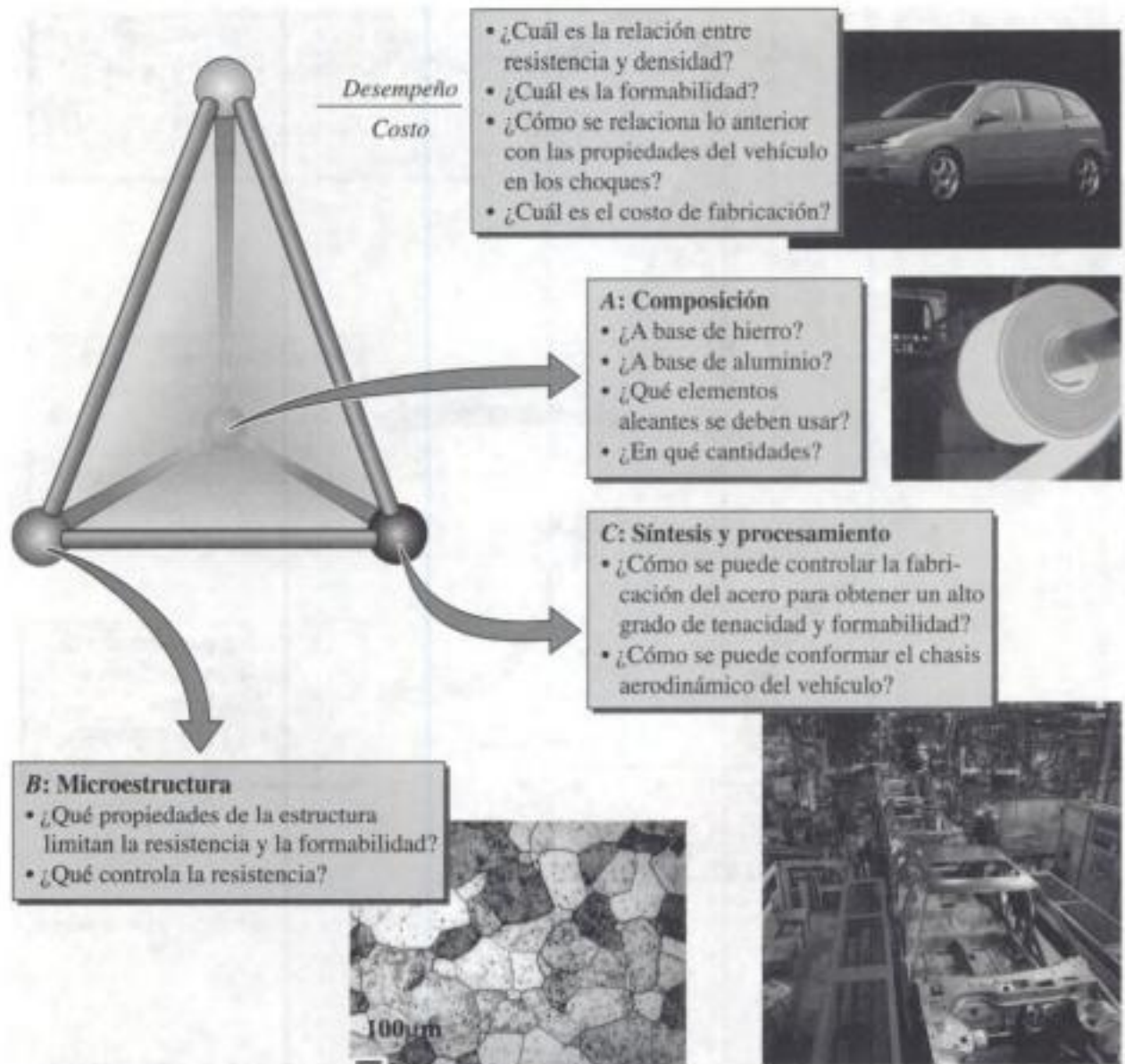


Figura 1-2 Aplicación del tetraedro de la ciencia e ingeniería de los materiales a los aceros laminados para chasis de automóvil. Obsérvese que la microestructura y la síntesis, y el procesamiento y la composición se interconectan entre sí y afectan la relación entre desempeño y costo.

Así, en el caso del acero laminado, los científicos en materiales se ocupan de

- la composición,
- la resistencia,
- el peso,
- las propiedades de absorción de energía y
- la maleabilidad (formabilidad).

Los científicos en materiales examinarían el acero a un nivel microscópico para determinar si se pueden alterar sus propiedades para cumplir todos estos requisitos. También

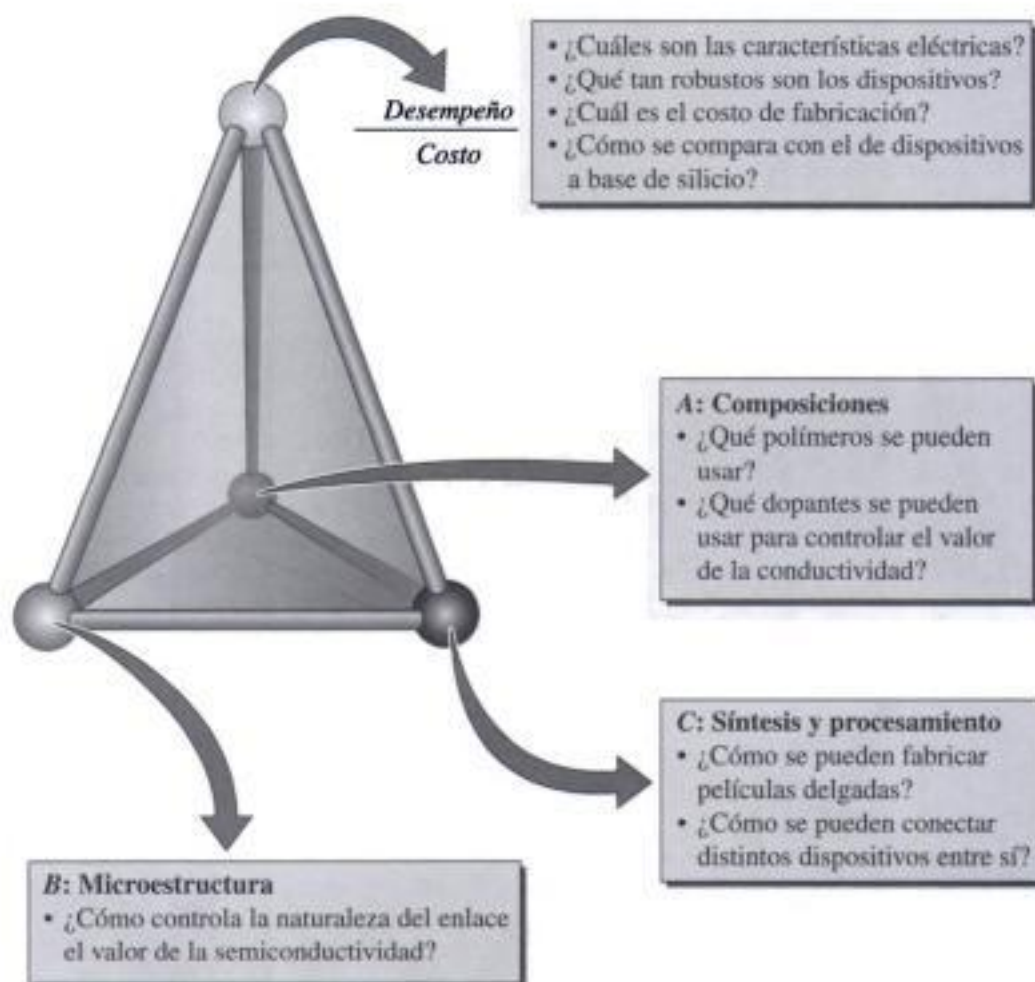


Figura 1-3 Aplicación del tetraedro de la ciencia e ingeniería de los materiales a polímeros semiconductores para microelectrónica.

deberían tener en cuenta el costo de procesar este acero, junto con otras consideraciones. ¿Cómo se pueden afectar las propiedades mecánicas del acero? ¿Qué clase de pinturas se pueden desarrollar para que el acero resista la corrosión? En algunas aplicaciones se necesita saber si esos aceros se pueden soldar con facilidad. En esta descripción se podrá ver que se deben tener en cuenta varios temas durante el diseño y la selección del material para cualquier producto.

Veamos otro ejemplo más, el de una clase relativamente nueva de materiales llamados polímeros semiconductores (Fig. 1-3). Alan J. Hegger, Alan G. MacDiarmid y Hideki Shirakawa obtuvieron el Premio Nobel de Química en 2000 por su descubrimiento de polímeros conductores eléctricos. Ahora se han procesado muchos polímeros semiconductores para fabricar diodos emisores de luz (LED). La mayoría de nosotros hemos visto LEDs en despertadores, relojes y otras pantallas. En esas pantallas se usan con frecuencia compuestos inorgánicos a base de arseniuro de galio (GaAs) y otros materiales. La ventaja de usar plásticos en la microelectrónica es que son ligeros y flexibles. Las preguntas que deben contestar los científicos e ingenieros en materiales en las aplicaciones de los polímeros semiconductores son:

- ¿Cuáles son las relaciones entre la estructura de los polímeros y sus propiedades eléctricas?
- ¿Cómo se pueden hacer dispositivos que usen esos plásticos?
- ¿Serán compatibles esos dispositivos con la tecnología actual de chips de silicio, o crearán por sí mismos una tecnología nueva?
- ¿Qué tan robustos o fuertes serán esos dispositivos?
- ¿Cómo se comparan el desempeño y el costo de esos dispositivos con los tradicionales?

Éstos son sólo algunos de los factores que deben tener en cuenta los ingenieros y los científicos durante el desarrollo, diseño y manufactura de dispositivos semiconductores poliméricos.

1-2

Clasificación de los materiales

Hay varias formas de clasificar los materiales. Una de ellas consiste en describir cinco grupos (tabla 1-1):

1. **metales y aleaciones;**
2. **cerámicos, vidrios y vitrocerámicos;**
3. **polímeros (plásticos);**
4. **semiconductores y**
5. **materiales compuestos.**

Los materiales de cada uno de estos grupos poseen distintas estructuras y propiedades. Las diferencias de resistencia, que se comparan en la figura 1-4, ilustran el amplio margen de propiedades de donde pueden seleccionar los ingenieros. Como los materiales metálicos se usan mucho en aplicaciones de cargas dinámicas, sus propiedades mecánicas son de un gran interés práctico. Aquí las presentaremos en forma breve. El término *esfuerzo* indica una carga o una fuerza por unidad de área. *Deformación unitaria* se refiere al alargamiento o a un cambio de dimensión, dividido entre la dimensión original. La aplicación del *esfuerzo* causa la *deformación unitaria*. Si esa deformación unitaria desaparece después de haber quitado la carga o el esfuerzo aplicado, se dice que la deformación es *elástica*. Si la deformación unitaria permanece después de eliminar el esfuerzo, se dice que la deformación unitaria es *plástica*. Cuando la deformación es elástica y el esfuerzo y la deformación guardan una relación lineal, la pendiente del diagrama esfuerzo-deformación unitaria se le llama módulo de elasticidad o módulo de Young. Al valor de esfuerzo necesario para iniciar la deformación plástica se le llama *resistencia de cedencia*. La deformación porcentual máxima que se puede alcanzar es una medida de la ductilidad de un material metálico. Todos estos conceptos se describen con detalle en el capítulo 6.

Metales y aleaciones Incluyen aceros, aluminio, magnesio, zinc, hierro colado, titanio, cobre y níquel. En general, los metales tienen buena conductividad eléctrica y térmica. Los metales y las aleaciones tienen una resistencia relativamente alta, gran rigidez, ductilidad o formabilidad y buena resistencia a los choques térmicos. Tienen utilidad especial en aplicaciones estructurales o bajo cargas dinámicas. Aunque a veces se usan metales puros, las mezclas de metales llamadas aleaciones permiten mejorar determinadas propiedades o mejores combinaciones de propiedades. El corte longitudinal de un motor de reacción que se ve en la figura 1-5 ilustra el uso de materiales metálicos en varias aplicaciones críticas.

TABLA 1-1 ■ Ejemplos representativos, aplicaciones y propiedades para cada categoría de materiales

	Ejemplos de aplicaciones	Propiedades
Metales y aleaciones		
Cobre	Conductores eléctricos	Alta conductividad eléctrica, buena formabilidad
Hierro colado gris	Bloques de motor para automóvil	Se puede fundir y maquinar; amortigua vibraciones
Aceros aleados	Herramientas, chasis de automóviles	Se endurece bastante con tratamiento térmico
Cerámicos y vidrios		
SiO_2 - Na_2O - CaO	Vidrio de ventanas	Ópticamente transparente; aislante térmico
Al_2O_3 , MgO , SiO_2	Refractarios (es decir, forro de hornos resistente al calor) para contener metal fundido	Aislante térmico; resiste altas temperaturas, relativamente inerte al metal fundido
Titanato de bario	Capacitores para microelectrónica	Gran capacidad de almacenamiento de carga
Sílice	Fibras ópticas para tecnología de la información	Índice de refracción, bajas pérdidas ópticas
Polímeros		
Polietileno	Empaque de alimentos	Se moldea con facilidad en película delgada, flexible y hermética al aire
Epóxicos	Encapsulamiento de circuitos integrados	Aislante eléctrico y resistente a la humedad
Fenólicos	Adhesivos para unir capas en madera terciada	Fuerte y resistente a la humedad
Semiconductores		
Silicio	Transistores y circuitos integrados	Comportamiento eléctrico único
GaAs	Sistemas optoelectrónicos	Convierte señales eléctricas en luz; láseres, diodos de láser, etcétera.
Materiales compuestos		
Grafito-resina epóxica	Componentes de aviones	Alta relación de resistencia a peso
Carburo de tungsteno-cobalto (WC-Co)	Herramientas de corte de carburo para maquinado	Alta dureza pero buena resistencia al choque
Acero revestido de titanio	Recipientes de reactor	Bajo costo y alta resistencia del acero con la resistencia del titanio a la corrosión

Cerámicos, vidrios y vitrocerámicas Los cerámicos se pueden definir como materiales cristalinos inorgánicos. Es posible que sean los materiales más "naturales". La arena de la playa y las rocas son ejemplo de cerámicos naturales. Los cerámicos avanzados son materiales obtenidos refinando cerámicos naturales y con otros procesos especiales. Se usan en sustratos que albergan chips de computadora, sensores y actuadores, capacitores, comunicaciones inalámbricas, bujías de motores, inductores y aislantes eléctricos. Algunos cerámicos se usan como recubrimientos, actuando como barrera para proteger sustratos metálicos en motores de turbina. También se usan en productos para el consumidor como pinturas, plásticos y neumáticos, así como en aplicaciones industriales como losetas para transbordadores espaciales, soporte de catalizador y en los sensores de oxígeno que usan los automóviles. Las cerámicas tradicionales se usan para fabricar ladrillos, vajillas, artículos sanitarios, refractarios (materiales

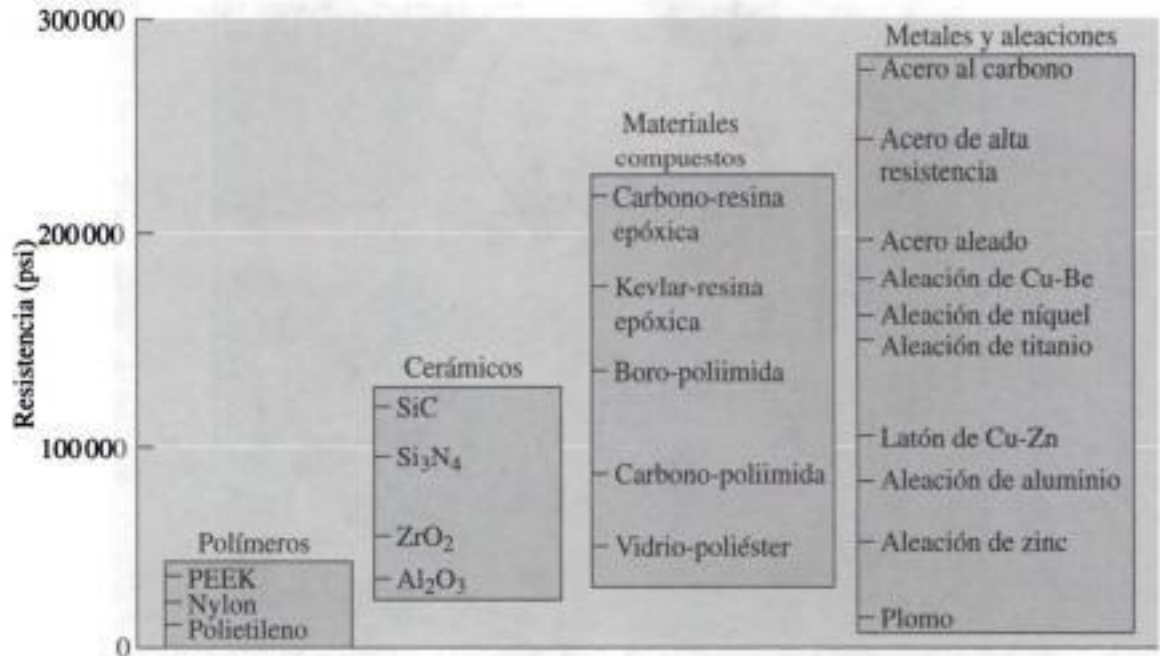


Figura 1-4 Resistencias representativas de diversas categorías de materiales.

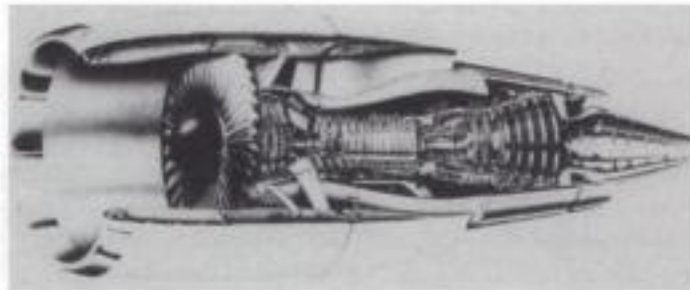


Figura 1-5 Corte de un motor de cohete. La sección delantera es de compresión y opera a temperaturas de bajas a intermedias, y con frecuencia se usan partes de titanio. La sección trasera es de combustión y opera a temperaturas altas; se requiere usar superaleaciones base níquel. La cubierta externa está sometida a bajas temperaturas, y son satisfactorios los materiales compuestos y las aleaciones base aluminio. (Cortesía de GE Aircraft Engines.)

resistentes al calor) y abrasivos. En general, debido a la presencia de porosidad (pequeños agujeros), no conducen bien el calor y deben calentarse a temperaturas muy altas para que se fundan. Los cerámicos son resistentes y duros, pero también muy frágiles. Normalmente, se preparan polvos finos de cerámico para moldearlos en diversas formas. Las nuevas técnicas de procesamiento obtienen cerámicos con la resistencia suficiente a la fractura como para usarlos en aplicaciones bajo cargas dinámicas, como por ejemplo, en impulsores de motores de turbina (Fig. 1-6). Los cerámicos tienen una resistencia excepcional a la compresión. ¿Puede creer el lector que se puede soportar todo un camión de bomberos usando cuatro tazas de cerámica para café?



Figura 1-6 Una diversidad de partes complejas de cerámica, incluyendo impulsores y sus álabes, permiten que las turbinas funcionen más eficientemente a temperaturas mayores. (Cortesía de Certech, Inc.)

Vidrio Es un material amorfo y se obtiene con frecuencia, pero no siempre, de la sílice fundida. El término *amorfo* se aplica a materiales que no tienen arreglo regular y periódico de sus átomos. Los materiales amorfos se describirán con detalle en el capítulo 3. La industria de fibras ópticas se basa en esas fibras, que son de vidrio de sílice de alta pureza. Los vidrios también se usan en las casas, los automóviles, pantallas de computadora y de televisión y cientos de otras aplicaciones. Los vidrios se pueden tratar térmicamente (temprar) para hacerlos más resistentes. Al moldear los vidrios y nuclear (formar) pequeños cristales dentro de ellos con un proceso térmico especial, se producen materiales llamados vitrocerámicas. El Zerodur™ es un ejemplo de material vitrocerámico que se usa para fabricar los sustratos de los espejos de grandes telescopios (como, por ejemplo, los telescopios Chandra y Hubble). Los vidrios y las vitrocerámicas suelen procesarse por fusión y colado.

Polímeros Los polímeros son materiales orgánicos comunes. Se producen con un proceso llamado **polimerización**. Entre los materiales poliméricos están el caucho (elastómeros) y muchas clases de adhesivos. Muchos polímeros tienen una resistividad eléctrica muy buena. También pueden proporcionar un buen aislamiento térmico. Aunque tienen menos resistencia, tienen una **relación de resistencia a peso** muy buena. Normalmente no son adecuados para usos a altas temperaturas. Muchos polímeros tienen muy buena resistencia a las sustancias corrosivas. Tienen miles de aplicaciones: desde chalecos antibalas, discos compactos (CD), cuerdas y pantallas de cristal líquido (LCD, por sus siglas en inglés), hasta ropa y tazas de café. Los polímeros **termoplásticos**, cuyas largas cadenas moleculares no están unidas en forma rígida, tienen buena ductilidad y formabilidad; los polímeros **termofijos** son más resistentes, pero

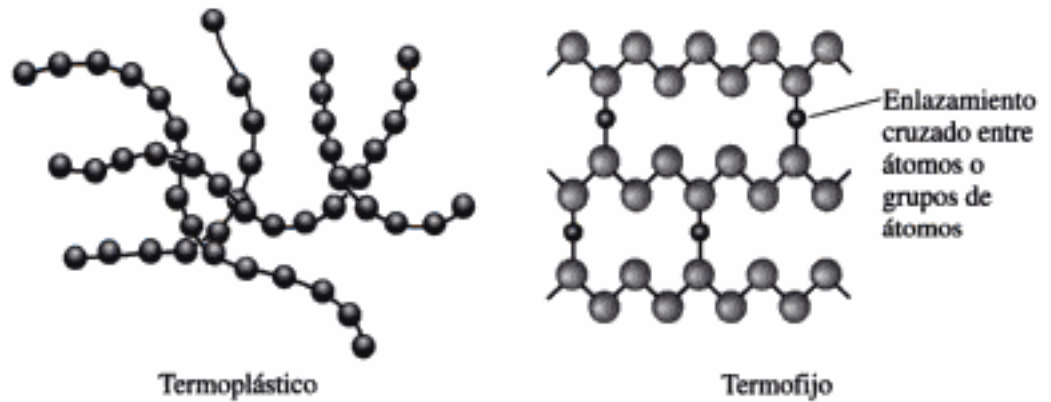


Figura 1-7 La polimerización se produce cuando las moléculas pequeñas, representadas por las esferas, se combinan para producir moléculas más largas o polímeros. Las moléculas de polímero pueden tener una estructura formada por muchas cadenas, enredadas pero no unidas (termoplásticos) o pueden formar redes tridimensionales cuyas cadenas tienen enlaces cruzados (termofijos).

más frágiles porque las cadenas moleculares están estrechamente enlazadas (Fig. 1-7). Los polímeros tienen muchos usos, que incluyen dispositivos electrónicos (Fig. 1-8). Los termoplásticos se fabrican conformándolos en estado fundido. Los termofijos se cuecen en moldes. Los **plásticos** contienen aditivos.



Figura 1-8 Los polímeros se usan en una diversidad de dispositivos electrónicos, como estos interruptores de palanca para computadora, donde se requieren resistencia a la humedad y baja conductividad. (Cortesía de CTS Corporation.)

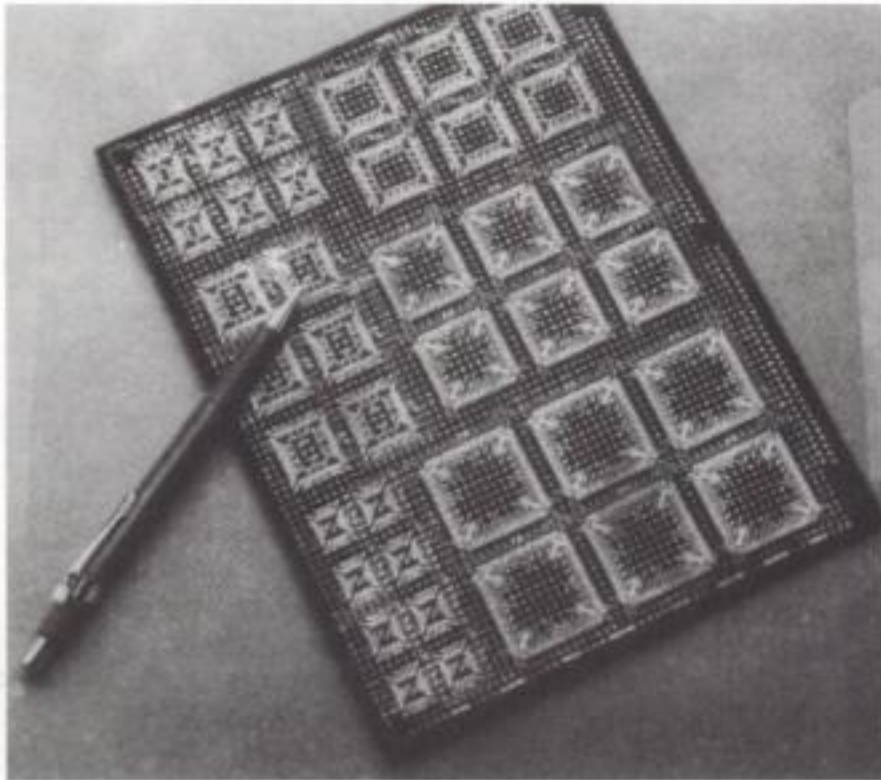


Figura 1-9 Los circuitos integrados para computadoras y otros dispositivos electrónicos se basan en el comportamiento eléctrico exclusivo de los materiales semiconductores. (Cortesía de Rogers Corporation.)

Semiconductores Los semiconductores base silicio, germanio y arseniuro de galio, como los que se usan en las computadoras y en electrónica, son parte de una clase más amplia, la de los materiales electrónicos. La conductividad eléctrica de los materiales semiconductores es intermedia entre la de los aisladores cerámicos y los conductores metálicos. Los **semiconductores** han activado la Era de la Información. En algunos de ellos, se puede controlar el valor de la conductividad, lo que permite usarlos en dispositivos electrónicos como transistores, diodos y circuitos integrados (Fig. 1-9). En muchas aplicaciones, se necesitan monocristales grandes de material semiconductor. Éstos se cultivan de materiales fundidos. Con frecuencia, también se fabrican películas delgadas de materiales semiconductores mediante procesos especializados.

Materiales compuestos (o compósitos) La idea principal del desarrollo de **materiales compuestos** es combinar las propiedades de materiales distintos. Se forman a partir de dos o más materiales y se obtienen propiedades que no posee un solo material. El concreto, la madera terciada y los plásticos reforzados con fibras de vidrio son ejemplos de materiales compuestos. Estos últimos se fabrican dispersando fibras de vidrio en una matriz de polímero. Las fibras de vidrio hacen más rígido al polímero sin aumentar mucho su densidad. Con materiales compuestos se pueden obtener materiales ligeros, resistentes, dúctiles, resistentes a altas temperaturas, o también se pueden fabricar herramientas de corte duras, pero resistentes al choque, que se romperían de no alear esos materiales. Los vehículos aéreos y aeroespaciales dependen mucho de materiales compuestos como, por ejemplo, los polímeros reforzados con fibra de carbono (Fig. 1-10). Los equipos deportivos como bicicletas, palos de golf, raquetas de tenis y otros por el estilo también usan distintos tipos de materiales compuestos que son ligeros y rígidos.[9,10]



Figura 1-10 El ala en X para los helicópteros avanzados es de un material formado con un polímero reforzado con fibra de carbono. (Cortesía de Sikorsky Aircraft Division—United Technologies Corporation.)

1-3

Clasificación funcional de los materiales

Una clasificación funcional de los materiales puede ser de gran utilidad. Se pueden clasificar con base en si su función más importante es mecánica (estructural), biológica, eléctrica, magnética u óptica. Esta clasificación de los materiales se ve en la figura 1-11. Se muestran algunos ejemplos de cada categoría, y éstas se pueden seguir subdividiendo en subcategorías.

Aeroespaciales En su vuelo histórico, los hermanos Wright usaron materiales ligeros, como madera y una aleación de aluminio (que por accidente reforzó el motor porque se contaminó con cobre del molde que usaron en su colado).[11] Hoy, el transbordador espacial de la NASA usa polvo de aluminio en los cohetes de respaldo. A esta categoría pertenecen algunas aleaciones de aluminio, plástico, sílice para las losetas y muchos otros materiales.

Biomédicos Nuestros huesos y dientes están formados, en parte, de una cerámica natural llamada hidroxiapatita. Varios órganos artificiales, reemplazos de hueso, injertos cardiovasculares, abrazaderas de ortodoncia y otras partes se fabrican usando distintos plásticos, aleaciones de titanio y aceros inoxidables no magnéticos. Los sistemas de imágenes ultrasónicas usan los cerámicos llamados PZT (titanato de plomo y zirconio). Los electroimanes que se usan en la obtención de imágenes de resonancia magnética usan superconductores metálicos de niobio con base de estaño.

Materiales electrónicos Como se dijo anteriormente, los semiconductores, como los hechos de silicio, se usan para fabricar circuitos integrados para chips de computadora. Se usan titanato de bario (BaTiO_3), óxido de tantalio (Ta_2O_5) y muchos otros materiales dieléctricos para fabricar capacitores cerámicos y otros dispositivos. Los superconductores se usan en la fabricación de poderosos electroimanes. El cobre, aluminio y otros metales se usan como conductores en la transmisión de electricidad y en microelectrónica.



Figura 1-11 Clasificación funcional de los materiales. Obsérvese que los metales, los plásticos y los cerámicos se encuentran en categorías distintas. Se muestran unos pocos ejemplos de cada categoría.

Tecnología energética y tecnología ambiental En la industria nuclear se usan materiales como dióxido de uranio y plutonio como combustible. Para manejar los materiales nucleares y administrar los desechos radiactivos, se usan muchos otros materiales, como vidrios y aceros inoxidables. En las nuevas tecnologías que se relacionan con las baterías y las celdas de combustible se usan muchos materiales cerámicos, como la circonia (ZrO_2) y los polímeros. La tecnología de las baterías ha adquirido mucha importancia, por necesidad, en muchos dispositivos electrónicos, de energía duradera y portátil. También las celdas de combustible se usarán en los automóviles eléctricos.[12] La industria del crudo y el petróleo usa ampliamente las zeolitas, alúmina y otros materiales como sustratos catalizadores. Los catalizadores son de Pt (platino), Pt/Rh (platino rodio) y muchos otros metales. Muchas tecnologías de membrana para purificar líquidos y gases usan los cerámicos y los plásticos. La energía solar se genera usando materiales como silicio amorfo (a:Si:H).

Materiales magnéticos Los discos duros de las computadoras y las cintas de videocasetas usan muchos materiales cerámicos, metálicos y poliméricos que son magnéticos. Por ejemplo, sobre un sustrato de polímero se depositan partículas de una forma especial del óxido de hierro, llamada óxido de hierro gamma ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) para fabricar las cintas de audio. Para fabricar las cintas de video, se usan partículas de hierro de gran pureza. Los discos duros de las computadoras se fabrican con aleaciones a base de cobalto, platino, tantalio y cromo (Co-Pt-Ta-Cr). Muchas ferritas magnéticas se usan para fabricar inductores y componentes para comunicaciones inalámbricas. Los aceros a base de hierro y silicio se usan para fabricar núcleos de transformadores.

Materiales fotónicos u ópticos Se usa mucho la sílice para fabricar fibras ópticas. En todo el mundo se han instalado casi diez millones de kilómetros de fibra óptica.[13] Los materiales ópticos se utilizan en los detectores y láseres de semiconductor, que se usan en los sistemas de comunicaciones con fibras ópticas y en otras aplicaciones. Para hacer láseres se usan granates de alúmina (Al_2O_3) y de itrio y aluminio (YAG, *yttrium aluminum garnet*). Con la sílice amorfa se hacen celdas solares y módulos fotovoltaicos. Hay polímeros que se usan en la fabricación de pantallas de cristal líquido.

Materiales inteligentes Un **material inteligente** puede sentir un estímulo interno, como un cambio de temperatura, la aplicación de un esfuerzo o un cambio de humedad o de ambiente químico, y responder a él. En general, un sistema basado en un material inteligente consiste en sensores y actuadores que detectan cambios e inician una acción. Como ejemplo de un material inteligente pasivo está el titanato de plomo y zirconio (*PZT*) y las aleaciones con memoria de forma. Cuando se procesa en forma adecuada, el *PZT* se puede someter a un esfuerzo y se genera un voltaje. Este efecto se emplea en la fabricación de dispositivos como generadores de chispas para parrillas de gas y sensores que pueden detectar objetos bajo el agua, como peces o submarinos. Entre otros ejemplos de materiales inteligentes, se encuentran los fluidos magnetorreológicos (o *MR*).[14] Son pinturas magnéticas que responden a campos magnéticos. Se usan en los sistemas de suspensión de automóviles como el Cadillac™ 2003. Hay otros ejemplos de materiales y sistemas inteligentes, como los vidrios fotocromáticos y los espejos de opacidad automática.

Materiales estructurales Son los que se diseñan para soportar alguna clase de esfuerzo. Para construir edificios y puentes, se usan aceros, concreto y materiales compuestos. Los aceros, vidrios, plásticos y materiales compuestos también se usan mucho en la fabricación de automóviles. Con frecuencia, en esas aplicaciones se necesita tener combinaciones de resistencia, rigidez y tenacidad bajo distintas condiciones de temperatura y carga.

Como se dijo anteriormente, el término *estructura* indica el arreglo atómico de un material; la estructura a escala microscópica se llama *microestructura*. Podemos considerar esos arreglos en distintas escalas: desde algunas unidades angstrom hasta un milímetro. En el capítulo 3 aprenderemos que algunos materiales pueden ser **crystalinos** (los átomos del material se ordenan en forma periódica) o pueden ser amorfos (donde los átomos del material no tienen orden en gran escala). Algunos materiales cristalinos pueden estar en forma de un cristal y se llaman **monocristales**. Otros están formados por muchos cristales o **granos** y se llaman **policristalinos**. Las características de los cristales o granos (tamaño, forma, etc.) y la de las regiones entre ellos, llamadas **límites de grano**, influyen también sobre sus propiedades. En capítulos posteriores seguiremos describiendo estos conceptos. En la figura inicial de este capítulo se ve una micrografía de acero inoxidable que muestra los granos y los límites de grano.

1-5

Efectos ambientales y de otra índole

Las relaciones entre estructura y propiedades de los materiales fabricados en forma de componentes se ven influidas con frecuencia por el entorno al que está expuesto el material durante su uso. Puede ser una exposición a temperaturas altas o bajas, esfuerzos cíclicos, impacto súbito, corrosión u oxidación. Se deben tener en cuenta estos efectos en el diseño, para asegurar que los componentes no fallen en forma inesperada.

Temperatura Los cambios de temperatura modifican profundamente las propiedades de los materiales (Fig. 1-12). Los metales y las aleaciones que se hayan endurecido con ciertos tratamientos térmicos o técnicas de formado pueden perder repentinamente su resistencia al calentarlos. Un recordatorio trágico de que esto puede suceder es el colapso de las torres del World Trade Center el 11 de septiembre de 2001.

Las temperaturas elevadas cambian la estructura de las cerámicas y funden o carbonizan los polímeros. En el otro extremo, las temperaturas muy bajas pueden hacer que un metal o un polímero falle por fragilidad, aun cuando las cargas aplicadas sean bajas. Esta fragilización a bajas temperaturas fue uno de los factores que causó la ruptura del casco del *Titanic*. [15,16] De manera parecida, el accidente del *Challenger* en 1986 se debió, en parte, a la fragilización de los sellos "O" de hule. [17] Son diversas las razones por las cuales algunos polímeros y algunos materiales metálicos se vuelven frágiles. Describiremos estos conceptos en capítulos posteriores.

El diseño de materiales con mejor resistencia a temperaturas extremas es esencial en muchas tecnologías, como se ve en el aumento de las temperaturas de funcionamiento de los aviones y los vehículos aeroespaciales (Fig. 1-13). A medida que se alcanzan mayores velocidades, hay más calentamiento en la cubierta del vehículo, debido a la fricción con el aire. Además, los motores funcionan con mayor eficiencia a mayores temperaturas. Entonces, para alcanzar mayor velocidad y mejor rendimiento de combustible, se han venido aumentando en forma gradual las temperaturas de la cubierta y de los motores con nuevos materiales. Pero los ingenieros en materiales se enfrentan continuamente con nuevos desafíos. Los vehículos *X-33* y *Venturestar* son ejemplos de vehículos reusables avanzados, para transportar pasajeros al espacio usando motores cohete de una sola etapa. La figura 1-14 muestra un esquema del prototipo del *X-33*. [18] Es necesario el desarrollo de materiales y técnicas de procesamiento todavía más refinados, para tolerar las altas temperaturas que se presentarán.

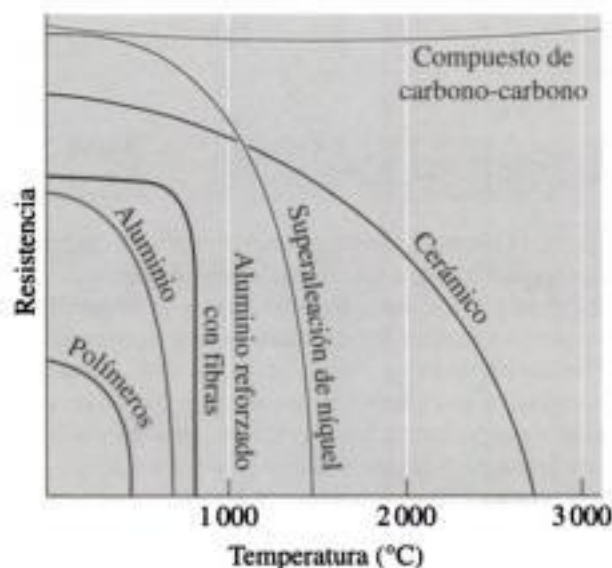


Figura 1-12 Normalmente, el aumento de la temperatura reduce la resistencia de un material. Los polímeros sólo son adecuados para bajas temperaturas. Algunos materiales compuestos, como los de carbono-carbono, las aleaciones especiales y los cerámicos, tienen propiedades excelentes a altas temperaturas.

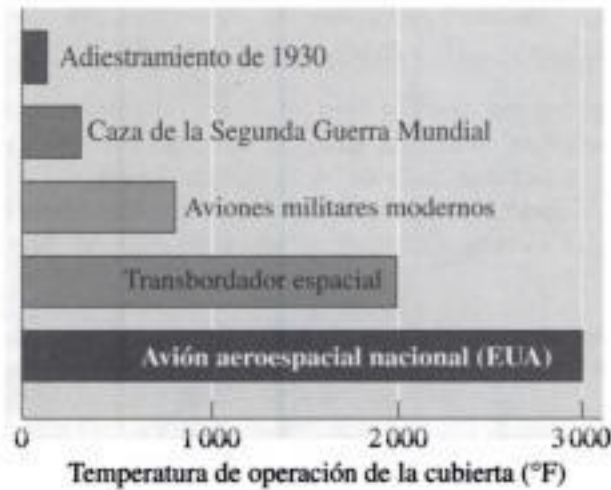


Figura 1-13 Las temperaturas de funcionamiento de la cubierta en los aviones han aumentado con el desarrollo de mejores materiales. (De acuerdo con M. Steinberg, *Scientific American*, octubre de 1986.)

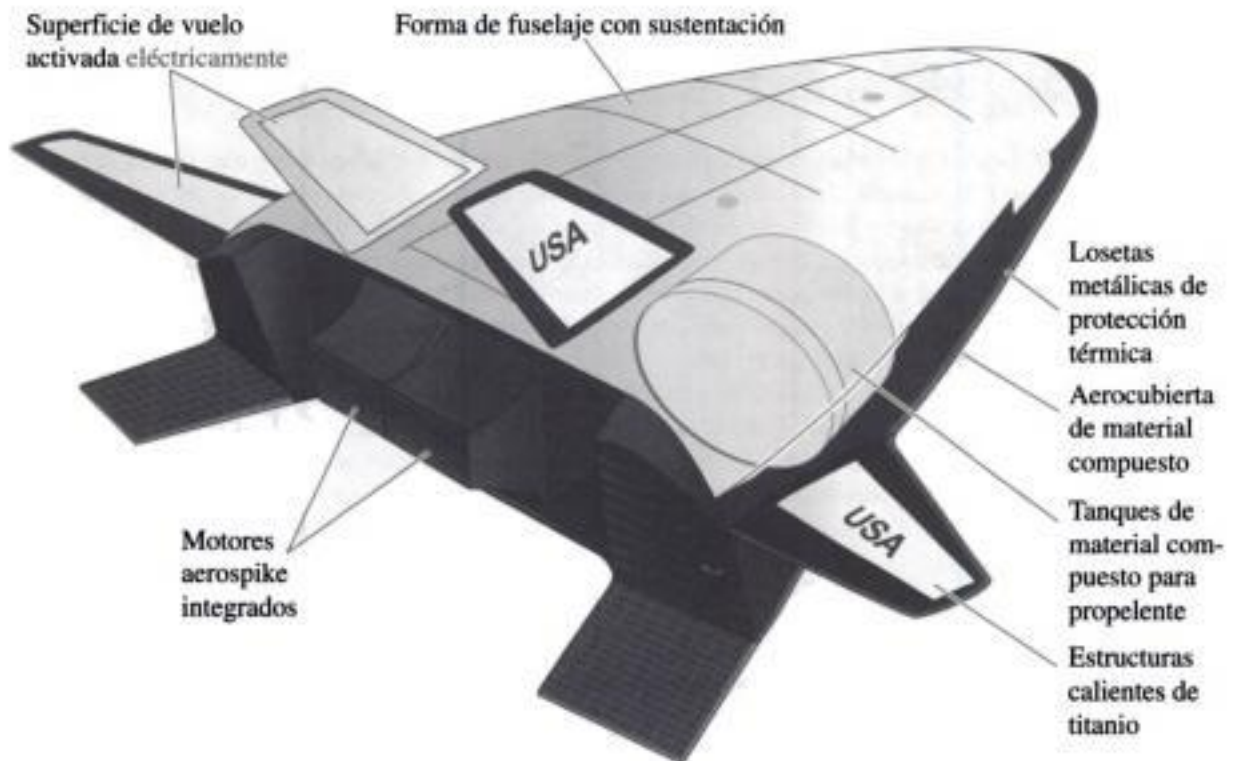


Figura 1-14 Esquema del prototipo de un avión X-33. Obsérvese que usa diferentes materiales en distintas partes. Esta clase de vehículo probará varios componentes de la *Venturestar*. (De "A Simpler Ride into Space", por T. K. Mattingly, octubre de 1997, *Scientific American*, p. 125. Copyright © 1997 Slim Films.)

Corrosión La mayoría de los metales y los polímeros reaccionan con oxígeno u otros gases, en especial a temperaturas elevadas. Los metales y las cerámicas se pueden desintegrar, y los polímeros y las cerámicas sin óxidos se pueden oxidar. El ingeniero afronta el reto de seleccionar materiales o recubrimientos que eviten esas reacciones y permitan el funcionamiento

en ambientes extremos. En las aplicaciones espaciales se debe tener en cuenta el efecto de la presencia de radiaciones y de oxígeno atómico.

Fatiga En muchas aplicaciones se deben diseñar los componentes de forma tal que la carga en el material no sea suficiente para causar su deformación permanente. Sin embargo, cuando un material se carga y descarga miles de veces, pueden comenzar a formarse pequeñas grietas y, cuando éstas crezcan, dicho material falla. A esto se le llama **falla por fatiga**. Al diseñar componentes sujetos a cargas dinámicas, se debe tener en cuenta la posibilidad de que haya fatiga.

Rapidez de deformación Muchas personas saben que *Silly Putty®*, un plástico basado en la silicona, se puede estirar mucho si se tensa con lentitud (pequeña rapidez de deformación). Si se tensa con rapidez (mayor rapidez de deformación), se rompe. Muchos materiales metálicos pueden tener un comportamiento parecido. Así, en muchas aplicaciones, se deben tener en cuenta la rapidez de deformación y su valor.

En muchos casos, pueden estar interrelacionados los efectos de la fatiga, el esfuerzo y la corrosión, y otros efectos externos pueden afectar el funcionamiento del material.

1-6

Diseño y selección de materiales

Cuando se diseña un material para determinada aplicación, deben tenerse en cuenta varios factores. El material debe adquirir las propiedades físicas y mecánicas necesarias, debe ser capaz de procesarse o fabricarse en la forma deseada y debe proporcionar una solución económica para el problema de diseño. También es esencial satisfacer esos requerimientos en una forma que proteja al ambiente, quizás promoviendo su reciclado. Para cumplir con estos requerimientos de diseño, el ingeniero debe definir varios compromisos que le permitan tener un producto adecuado, pero a la vez vendible.

Por ejemplo, el costo de un material suele calcularse con base en su peso (costo por kilogramo). En el diseño y en la selección, se debe tener en cuenta la **densidad** del material, es decir, su peso por unidad de volumen (tabla 1-2). El aluminio podrá costar más por kilogramo que el acero, pero sólo pesa la tercera parte. Aunque las partes fabricadas con aluminio deberán ser más gruesas, el aluminio empleado podrá ser menos costoso que cuando las partes se fabrican con acero, debido a la diferencia de peso.

TABLA 1-2 ■ Relaciones de resistencia a peso de varios materiales

Material	Resistencia (lb/pulg ²)	Densidad (lb/pulg ³)	Relación de resistencia a peso (pulg)
Polietileno	1 000	0.030	0.03×10^6
Aluminio puro	6 500	0.098	0.07×10^6
Al ₂ O ₃	30 000	0.114	0.26×10^6
Epóxicos	15 000	0.050	0.30×10^6
Acero aleado con tratamiento térmico	240 000	0.280	0.86×10^6
Aleación de aluminio con tratamiento térmico	86 000	0.098	0.88×10^6
Compuesto carbono-carbono	80 000	0.065	0.92×10^6
Aleación de titanio con tratamiento térmico	170 000	0.160	1.06×10^6
Compuesto de kevlar y resina epóxica	65 000	0.050	1.30×10^6
Compuesto de carbono y resina epóxica	80 000	0.050	1.60×10^6

En algunos casos, en especial en aplicaciones aeroespaciales, el peso es determinante, porque a mayor peso de la nave aumenta el consumo de combustible y reduce su alcance. Al usar materiales que sean ligeros pero muy resistentes, se pueden diseñar los vehículos aeroespaciales o automotrices de tal manera que se mejore la utilización del combustible. En muchos vehículos aeroespaciales avanzados se usan materiales compuestos, en lugar de aluminio. Esos materiales, como el sistema carbono/resina epóxica, son más costosos que las aleaciones tradicionales de aluminio; sin embargo, los ahorros de combustible que se obtienen con la mayor relación de resistencia a peso del material compuesto (tabla 1-2) puede compensar el mayor costo de la nave. Literalmente, hay miles de aplicaciones donde se usan consideraciones parecidas. En general, en la selección de los materiales intervienen compromisos entre muchas propiedades.

Al llegar a este punto de nuestra exposición, esperamos que el lector pueda apreciar que las propiedades de los materiales no sólo dependen de su composición, sino también de la forma (síntesis y procesamiento) como se fabrican esos materiales y, lo más importante, de su estructura interna. Es la razón por la que no se aconseja a un ingeniero consultar un manual y seleccionar un material para determinada aplicación. Los manuales pueden ser un buen punto de partida. Un buen ingeniero tendrá en cuenta: los efectos de la forma en que se fabricó el material; cuál es la composición exacta del material candidato para la aplicación que se esté considerando; cualquier procesamiento que deba hacerse para conformar el material o fabricar un componente; la estructura del material después de procesar y terminar el componente o dispositivo, el ambiente en el que se va a usar el material, y la relación de costo a desempeño. Anteriormente, en este capítulo describimos la necesidad de que el lector conozca los principios de la ciencia e ingeniería de los materiales. Si usted es ingeniero y necesita decidir cuáles materiales escogerá para fabricar un componente, el conocimiento de los principios de la ciencia e ingeniería de los materiales le proporcionará los conceptos fundamentales que le permitirán tomar decisiones técnicamente firmes durante el diseño con "materiales diseñados".

RESUMEN

- La ciencia y la ingeniería de los materiales constituyen un campo interdisciplinario que se ocupa de inventar nuevos materiales y dispositivos, y de mejorar los materiales que ya se conocen, desarrollando una comprensión más profunda de las relaciones entre su microestructura, composición, síntesis y procesamiento.
- Los materiales diseñados son los que se diseñan y fabrican teniendo en cuenta los principios de la ciencia e ingeniería de los materiales.
- Las propiedades de los materiales diseñados dependen de su composición, estructura, síntesis y procesamiento. Un índice importante de desempeño de los materiales o dispositivos es su relación de costo a desempeño.
- La estructura de un material se refiere al arreglo atómico o de los iones en el mismo.
- La estructura a nivel microscópico se conoce como microestructura.
- Muchas propiedades de los materiales dependen en gran parte de la estructura, aun cuando su composición sea la misma. Es la razón de la importancia extremadamente grande que tienen las relaciones entre estructura y propiedades o microestructura y propiedades.
- Los materiales se clasifican en metales y aleaciones, cerámicos, vidrios y vitrocerámicas, materiales compuestos, polímeros y semiconductores.
- Los metales y las aleaciones tienen buena resistencia, buena ductilidad y buena maleabilidad. Los metales tienen buena conductividad eléctrica y térmica. Los metales y las

aleaciones desempeñan un papel indispensable en muchas aplicaciones, como automóviles, edificios, puentes, aeroespaciales, etcétera.

- Los cerámicos son materiales cristalinos inorgánicos. Son resistentes, sirven como buenos aislantes eléctricos y térmicos y, con frecuencia, son resistentes a daños por altas temperaturas y ambientes corrosivos, pero mecánicamente son frágiles. Los cerámicos modernos forman la base de muchas de las tecnologías de microelectrónica y fotónica.
- Los polímeros tienen una resistencia relativamente baja; sin embargo, su relación de resistencia a peso es muy favorable. No son adecuados para usos a altas temperaturas. Tienen una resistencia a la corrosión muy buena y, como los cerámicos, forman buenos aislamientos eléctricos y térmicos. Los polímeros pueden hacerse dúctiles o frágiles, dependiendo de su estructura, temperatura y rapidez de deformación.
- Los semiconductores poseen propiedades eléctricas y ópticas únicas que los hacen esenciales en la manufactura de componentes de dispositivos electrónicos y de comunicaciones.
- Los materiales compuestos se obtienen a partir de muchas clases de materiales. Permiten combinar propiedades mecánicas y físicas en forma única que no pueden encontrarse en un solo material.
- En la clasificación de los materiales según sus funciones, se incluyen los materiales aeroespaciales, biomédicos, electrónicos, energéticos y ambientales, magnéticos, ópticos (fotónicos) y estructurales.
- Los materiales también se pueden clasificar en cristalinos y amorfos. Los materiales cristalinos pueden ser monocristalinos o policristalinos.
- Las propiedades de los materiales dependen de la temperatura, nivel y tipo de esfuerzo aplicado, rapidez de deformación, oxidación y corrosión, y otros factores ambientales.
- La selección de un material que tenga las propiedades necesarias y el potencial de fabricarse en forma económica y con seguridad, para obtener un producto útil es un proceso complicado que requiere conocer las relaciones entre su estructura, propiedades, procesamiento y composición.

GLOSARIO

Aleación Material metálico que se obtiene mediante combinaciones químicas de distintos elementos (por ejemplo, el acero se hace con hierro y carbono). Comúnmente, las aleaciones tienen mejores propiedades mecánicas que los metales puros.

Cerámicos Grupo de materiales cristalinos inorgánicos caracterizado por su buena resistencia, en especial a la compresión y temperaturas de fusión altas. Muchos cerámicos tienen propiedades muy buenas de aislamiento eléctrico y térmico.

Ciencia de materiales Campo de la ciencia que se ocupa de los estudios de las relaciones entre la estructura interna o microestructura, la síntesis y el procesamiento de los materiales y las propiedades de éstos.

Ciencia e ingeniería de materiales Campo interdisciplinario que se ocupa de inventar materiales nuevos y mejorar los que ya se conocen, desarrollando una comprensión más profunda de las relaciones entre microestructura, composición, síntesis y procesamiento de los distintos materiales.

Composición Constitución química de un material.

- Densidad** Masa por unidad de volumen de un material, que suele expresarse en g/cm^3 o en lb/pulg^3 .
- Estructura** Descripción de los arreglos de los átomos o los iones en un material. La estructura de los materiales tiene una influencia profunda sobre muchas de sus propiedades (aunque no cambie su composición química general).
- Estructura cristalina** Arreglo de los átomos en un material cristalino.
- Falla por fatiga** Falla de un material debida a la carga y descarga repetida.
- Granos** Cristales de un material policristalino.
- Ingeniería de materiales** Campo orientado a la ingeniería, que se enfoca en la forma de convertir o transformar materiales para obtener un dispositivo o estructura útil.
- Límites de grano** Regiones entre los granos de un material policristalino.
- Material cristalino** Material formado por uno o muchos cristales. En cada cristal, los átomos o los iones tienen un arreglo periódico en gran escala.
- Material inteligente** Material que puede sentir un estímulo externo, como un cambio de temperatura, la aplicación de un esfuerzo o un cambio de humedad o de ambiente químico, y responder a él.
- Material policristalino** Material formado por muchos cristales; lo contrario de un material monocristalino, que sólo tiene un cristal.
- Materiales compuestos (o compósitos)** Grupo de materiales obtenidos con mezclas de metales, cerámicos o polímeros, de tal forma que se obtengan combinaciones no frecuentes de propiedades (por ejemplo, el plástico reforzado con fibra de vidrio).
- Metal** Elemento que tiene enlace metálico y en general buena ductilidad, resistencia y conductividad eléctrica.
- Monocristal** Material cristalino formado por solo un cristal. No contiene límites de grano.
- Plásticos** Materiales poliméricos que contienen otros aditivos.
- Polimerización** Proceso por el cual las moléculas orgánicas se unen y forman moléculas gigantes o polímeros.
- Polímeros** Grupo de materiales que normalmente se obtienen uniendo moléculas orgánicas para formar cadenas o redes moleculares gigantes. Se caracterizan por tener baja resistencia, baja temperatura de fusión y mala conductividad eléctrica.
- Procesamiento** Distintas formas de conformar materiales o cambiar sus propiedades para obtener componentes útiles.
- Propiedades físicas** Las que describen características como color, elasticidad, conductividad eléctrica o térmica, magnetismo y el comportamiento óptico, que en general no están influidas en forma significativa por las fuerzas que actúan sobre un material.
- Propiedades mecánicas** Propiedades de un material, como la resistencia, que describen qué tanto resiste las fuerzas aplicadas, incluyendo fuerzas de tensión o de compresión, de impacto, cíclicas o de fatiga, o las fuerzas a altas temperaturas.
- Relación de resistencia a peso** Resistencia de un material dividida entre su densidad. Los materiales con gran relación de resistencia a peso son fuertes, pero ligeros.
- Semiconductores** Grupo de materiales cuya conductividad eléctrica es intermedia entre la de los metales y las cerámicas normales (por ejemplo, Si, GaAs).
- Síntesis** El proceso de fabricar materiales a partir de elementos o de químicos hechos por el hombre.

Termofijos Grupo especial de polímeros que al calentarlos se descomponen en vez de fundirse. Normalmente son bastante frágiles, debido a que tienen una estructura de red tridimensional relativamente rígida (por ejemplo, el poliuretano).

Termoplásticos Grupo especial de polímeros en los cuales las cadenas moleculares están enredadas, pero no interconectadas. Se pueden fundir con facilidad y moldear en formas útiles. En el caso normal, estos polímeros tienen una estructura de cadena (por ejemplo, el polietileno).

Tetraedro de la ciencia e ingeniería de los materiales Diagrama en forma de tetraedro que muestra la forma en que la relación de desempeño a costo de los materiales depende de la composición, la microestructura, la síntesis y el procesamiento de los mismos.

Vidrio Material amorfo derivado del estado fundido, en general, pero no siempre, a base de sílice.

Vitrocerámicos Clase especial de materiales que se obtienen moldeando un vidrio y tratándolo después con calor para formar cristales pequeños.

INFORMACIÓN ADICIONAL

1. CAHN, R. *The coming of Materials Science*, Pergamon, 2001.
2. BRONOWSKI, J. *The Ascent of Man*, Back Bay Books, 1973, pp. 124-131.
3. FORESTER, T., Ed. *The Materials Revolution*, MIT Press, 1988.
4. LEHNDORFF, B.R. "High T_c Superconductors for Magnet and Energy Technology", *Springer Tracts in Modern Physics*, Springer, 2001.
5. LIVINGSTON, J.D. *Driving Force*, Harvard Press, 1996.
6. MANNHART, J. y P. CHAUDHARI. "High- T_c Bicrystal Grain Boundaries", *Physics Today* (noviembre), 2001, pp. 48-53.
7. COOLEY, L.D. et al. "Potential Applications of Magnesium Diboride for Accelerator Magnet Applications", *Proc. of the 2001 Particle Accelerator Conf.*, Chicago, IEEE, 2001.
8. *Materials Science and Engineering: Forging Stronger Links to Users*, National Academy Press, 1999.
9. FROES, F.H. "Materials for Sports", *MRS Bulletin*, 1998, 23(3).
10. MUSCAT, A.J. et al. "Interdisciplinary Teaching and Learning in a Semiconductor Processing Course", *J. Engineering Education*, 1998, 87, p. 413.
11. GAYLE, F.W. y M. GOODWAY. "Precipitation Hardening in the First Aerospace Aluminum Alloy: The Wright Flyer Crankcase", *Science*, 266(5187), 1994, pp. 1015-1017.
12. WOUK, V. "Hybrid Electric Vehicles", *Scientific American*, octubre, 1997, pp. 70-74.
13. PALAIS, J.C. *Fiber Optic Communications*. 4a. ed., 1998.
14. PHULÉ, P.P. y GENDER, J.M. *MRS Bulletin*, agosto de 2001.
15. GANNON, R. "What Really Sank the Titanic", *Popular Science*, 246(2), 1995, pp. 49-55.
16. HILL, S. "The Mystery of the Titanic: A Case of Brittle Fracture?", *Materials World*, 4(6), 1996, pp. 334-335.
17. VAUGHAN, D. *The Challenger Launch Decision: Risky Technology, Culture, and Deviance at NASA*, Chicago Press, 1996.
18. MATTINGLY, T.K. "A Simpler Ride into Space", *Scientific American*, octubre, 1997, pp. 121-125.

✓ PROBLEMAS

Sección 1-1 ¿Qué es la ciencia e ingeniería de los materiales?

- 1-1 Defina ciencia e ingeniería de materiales.
- 1-2 Defina los siguientes términos: a) composición, b) estructura, c) síntesis, d) procesamiento y e) microestructura.
- 1-3 Explique la diferencia entre los términos ciencia de materiales e ingeniería de materiales.
- 1-4 Señale un descubrimiento revolucionario. Señale un descubrimiento evolucionario.

Sección 1-2 Clasificación de los materiales

Sección 1-3 Clasificación funcional de los materiales

Sección 1-4 Clasificación de los materiales con base en su estructura

Sección 1-5 Efectos ambientales y de otra índole

- 1-5 El acero se recubre con frecuencia con una capa delgada de zinc, cuando se va a usar a la intemperie. ¿Qué características cree que aporta el zinc a ese acero recubierto o galvanizado?
- 1-6 Se desea producir un toldo transparente para un avión. Si se usara un toldo cerámico (esto es, vidrio normal de ventanas), las rocas o los pájaros lo romperían. Diseñe un material que minimice los daños o que cuando menos evite que el toldo se rompa y se desintegre.
- 1-7 Los resortes helicoidales deben ser muy resistentes y rígidos. El Si_3N_4 es un material resistente y rígido. ¿Seleccionaría usted este material para un resorte? Explique por qué.
- 1-8 A veces se fabrican indicadores de temperatura con una banda metálica enrollada, que se desenrolla determinada cantidad cuando aumenta la temperatura. ¿Cómo funciona, de qué clase de material se debería hacer el indicador y cuáles son las propiedades importantes que debe tener?
- 1-9 Usted quiere diseñar un avión que pueda volar con la energía de un hombre, una distancia de 30 km sin escalas. ¿Qué clase de propiedades recomendaría para los materiales? ¿Cuáles serían los materiales adecuados?
- 1-10 Le gustaría poner en órbita un microsatélite de 90 cm. El satélite tendrá equipos eléctricos delicados que mandarían y recibirían señales de radio desde y hacia la Tierra. Diseñe la coraza externa (contenedor) dentro del que se colocará el equipo electrónico. ¿Qué propiedades se necesitarán y qué clase de materiales podrían tenerse en cuenta?
- 1-11 ¿Qué propiedades debe poseer la cabeza de un martillo de carpintero? ¿Cómo fabricaría dicha cabeza?
- 1-12 El casco de un transbordador espacial consta de losetas de cerámico pegadas a una cubierta de aluminio. Describa los requisitos de diseño del casco que determinaron el uso de esta combinación de materiales. ¿Qué problemas habrán afrontado los diseñadores y fabricantes para producir ese casco?
- 1-13 Usted desea seleccionar un material para los contactos eléctricos de un dispositivo conmutador eléctrico que abre y cierra con frecuencia y con fuerza. ¿Qué propiedades debe poseer el material de los contactos? ¿Qué clase de material recomendaría? ¿Sería bueno usar Al_2O_3 ? Explique por qué.
- 1-14 La densidad del aluminio es 2.7 g/cm^3 . Suponga que desea producir un material compuesto a base de aluminio que tuviera una densidad de 1.5 g/cm^3 . Diseñe un material que tenga esa densidad. ¿Sería factible la posibilidad de introducir en el aluminio perlas de polietileno cuya densidad es 0.95 g/cm^3 ? Explique por qué.
- 1-15 Desea identificar distintos materiales sin recurrir al análisis químico ni a extensos ensayos. Describa algunas técnicas posibles de prueba y clasificación que podrían usarse, con base en las propiedades físicas de los materiales.
- 1-16 Desea separar físicamente diversos materiales en una planta de reciclado de chatarra. Describa algunos métodos que se puedan usar para separar materiales como polímeros, aleaciones de aluminio y aceros entre sí.
- 1-17 Algunos pistones de motores automotrices podrían fabricarse con un material compuesto que contenga partículas pequeñas y duras de carburo de silicio en una matriz de aleación de aluminio. Explique las ventajas que cada material podría aportar a la parte en general. ¿Qué problemas podrían causar las distintas propiedades de los dos materiales en los pistones?

By Arkanosant...

Capítulo



Las fibras ópticas que se usan en la industria de las comunicaciones son una forma de sílice. La sílice es el compuesto químico principal que existe en la arena de las playas. La que se usa para fabricar fibras ópticas es amorfa y su pureza es extremadamente alta. (Cortesía de Corning Incorporated.)

Copyrighted material

Estructura atómica

¿Alguna vez se preguntó...

- ...qué es la nanotecnología?
- ...por qué el carbono en forma de diamante es uno de los materiales más duros que se conocen, pero como grafito es muy suave y se puede usar como lubricante sólido?
- ...por qué la sílice (o sílica), el principal componente químico de la arena de playa, se usa en forma ultrapura para fabricar fibras ópticas?

El objetivo de este capítulo es describir los conceptos fundamentales relacionados con la estructura de la materia. Examinaremos la estructura atómica con objeto de establecer una base para comprender la forma en que afecta las propiedades, los comportamientos y las aplicaciones consecuentes de los materiales de ingeniería. El lector aprenderá que la estructura de los átomos afecta los tipos de enlaces que mantienen unidos a los materiales. Estos distintos

tipos de enlace afectan en forma directa la aptitud de los materiales en las aplicaciones ingenieriles en el mundo real.

Tanto la **composición** como la **estructura** de un material tienen una influencia profunda sobre sus propiedades y su comportamiento. Los ingenieros y los científicos que estudian y desarrollan materiales deben comprender su estructura atómica. Veremos que las propiedades de los materiales se pueden controlar y que, en

realidad, se pueden adaptar a las necesidades de determinada aplicación, mediante el control de su estructura y composición.

La estructura de los materiales se puede examinar y describir en cinco niveles diferentes:

1. macroestructura,
2. microestructura,
3. nanoestructura,
4. arreglos atómicos de corto y largo alcance y
5. estructura atómica.

Los ingenieros y los científicos que se ocupan del desarrollo y las aplicaciones prácticas de materiales avanzados deben comprender la **microestructura** y la **macroestructura** de diversos materiales, así como la forma de controlarlas. La microestructura es la estructura del material a una **escala de longitud** de ~ 10 a 1000 nm. La escala de longitud es una longitud o intervalo de dimensiones características dentro de la que se describen las propiedades de un material o los fenómenos que suceden en los materiales. En el caso normal, la microestructura comprende propiedades como el tamaño promedio del grano, la distribución de ese tamaño, la orientación de los granos y otras propiedades relacionadas con los defectos en los materiales. (Un grano es una porción del material dentro de la cual el arreglo de los átomos es casi idéntico.) La macroestructura es la estructura del material a nivel macroscópico, donde la escala de longitud es $\sim > 1000$ nm. Entre las propiedades que cons-

tituyen la macroestructura están la porosidad, los recubrimientos superficiales y las microgrietas internas o externas.

También es importante comprender la **estructura atómica** y la forma en que los enlaces atómicos producen distintos arreglos atómicos o iónicos en los materiales. La estructura atómica incluye todos los átomos y sus arreglos, que constituyen los bloques estructurales de la materia. A partir de estos bloques estructurales emergen todos los nano, micro y macroniveles de estructura. Las perspectivas obtenidas al comprender la estructura atómica y las configuraciones de enlace de los átomos y moléculas son esenciales para una buena selección de materiales de ingeniería, así como para desarrollar nuevos materiales avanzados.

Un examen detenido del arreglo atómico permite distinguir entre materiales que son **amorfo**s (que carecen de un orden de largo alcance de los átomos o iones) o **cristalinos** (los que tienen arreglos geométricos periódicos de átomos o iones). Los materiales amorfo solo tienen **arreglos atómicos de corto alcance**, mientras que los materiales cristalinos tienen **arreglos de corto y largo alcance**. En los arreglos atómicos de corto alcance, los átomos o los iones muestran determinado orden solo dentro de distancias relativamente cortas. Para los materiales cristalinos, el orden atómico de largo alcance tiene la forma de átomos o iones ordenados en un arreglo tridimensional que se repite a lo largo de distancias mucho mayores (desde $\sim > 100$ nm hasta algunos centímetros).

2-1

La estructura de los materiales: importancia tecnológica

En el mundo actual hay muchas áreas, como la tecnología de la información, la biotecnología, la tecnología de la energía, del ambiente y muchas más, donde se requieren dispositivos cada vez más pequeños, más ligeros, más rápidos, portátiles, más eficientes, fiables, duraderos y poco costosos. Se requieren baterías que sean más pequeñas, más ligeras y durables. Se necesitan automóviles que sean relativamente asequibles, ligeros, seguros, con alto rendimiento de combustible y equipados con muchas funciones avanzadas, desde sistemas de posicionamiento global hasta complicados sensores para activar la bolsa de aire.

Algunas de esas necesidades han generado bastante interés en la **nanotecnología** y en los **sistemas micro-electromecánicos** (MEMS por sus siglas en inglés).[1.2] Un ejemplo de estos

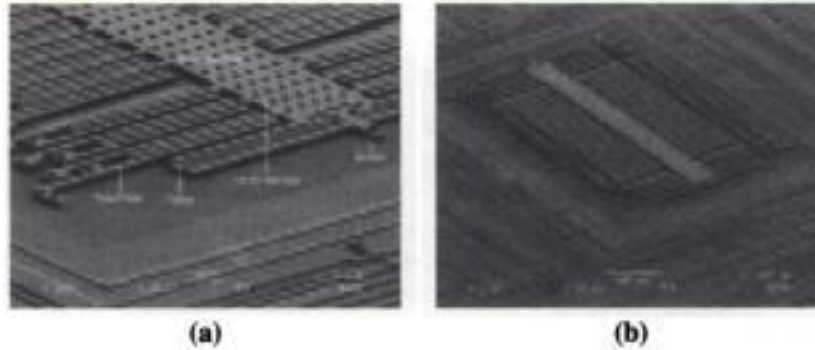


Figura 2-1 Los sensores de silicio micromaquinado se usan en los automóviles para controlar el inflado de las bolsas de aire. (Cortesía del Dr. John Yasaitis, Analog Devices, Inc.)

últimos en el mundo real se ve en la figura 2-1, la cual muestra un pequeño sensor de aceleración que se obtiene con micromaquinado de silicio (Si). Este sensor se usa para medir la aceleración en automóviles. La información se procesa en una computadora central, y después se usa para controlar la activación de la bolsa de aire. Las propiedades y el comportamiento de los materiales a estos niveles "micro" pueden variar mucho, en comparación con los que tienen a nivel "macro" o en el volumen. En consecuencia, comprender la estructura a nanoescala, que es la **nanoestructura** (es decir, la estructura y las propiedades de los materiales a una **nanoescala**, o una escala de longitud de ~ 1 a 100 nm) y la microestructura son ramas que han recibido considerable atención. El término *nanotecnología* se usa para describir un conjunto de tecnologías que se basan en fenómenos físicos, químicos y biológicos que suceden en la nanoescala.

Las aplicaciones que se muestran en la tabla 2-1 y en sus figuras (2-2 a 2-7) ilustran la importancia de los distintos niveles de estructura en las propiedades de un material. Las aplicaciones que se muestran se descomponen por sus niveles de estructura y escalas de longitud (la longitud característica aproximada que es importante para determinada aplicación). Además de la ilustración, también se incluyen ejemplos de la forma como esa aplicación se usaría en la industria.

Ahora dirigiremos nuestra atención a los detalles concernientes a la estructura de los átomos, el enlace entre ellos y el modo en que forman una base de las propiedades de los materiales. La estructura atómica influye sobre la forma en que se enlazan los átomos entre sí. La comprensión de esto ayuda a clasificar los materiales en metales, semiconductores, cerámicas o polímeros. También nos permite llegar a algunas conclusiones generales acerca de las propiedades mecánicas y los comportamientos físicos de estas cuatro clases de materiales.

2-2

La estructura del átomo

Un átomo está formado por un núcleo rodeado por electrones. El núcleo contiene neutrones y protones, estos últimos con carga positiva, y tiene una carga neta positiva. Los electrones tienen carga negativa y se mantienen cerca del núcleo por atracción electrostática. La carga eléctrica q que lleva cada electrón y cada protón es 1.60×10^{-19} coulomb (C). Como las cantidades de electrones y protones en un núcleo son iguales, el átomo como un todo es eléctricamente neutro.

El **número atómico** de un elemento es igual a la cantidad de electrones o protones en cada átomo. Así, un átomo de hierro, que contiene 26 electrones y 26 protones, tiene número atómico 26.

La mayor parte de la masa del átomo está contenida en el núcleo. La masa de cada protón y cada neutrón es 1.67×10^{-24} g, pero la masa de cada electrón sólo es de 9.11×10^{-28} g. La **masa atómica** M , que es igual a la cantidad promedio de protones y neutrones en un átomo, también es la masa, en gramos, del **número de Avogadro** N_A de átomos. La cantidad $N_A = 6.02 \times 10^{23}$ átomos/mol es la cantidad (o el número) de átomos o moléculas en un mol. En

TABLA 2-1 ■ Niveles de estructuras

Nivel de estructura	Ejemplo de tecnologías
Estructura atómica	<i>Diamante:</i> El diamante se basa en enlaces covalentes carbono-carbono (C-C). Se espera que los materiales con esta clase de enlaces sean relativamente duros. Se usan películas delgadas de diamante para proporcionar un filo resistente al desgaste para herramientas de corte.
Arreglos atómicos: orden de largo alcance	<i>Titanato de plomo y zirconio</i> [$Pb(Zr_xTi_{1-x})$] o <i>PZT</i> : cuando los iones en este material se arreglan de modo que tengan estructuras cristalinas tetragonales o romboédricas, el material es piezoeléctrico: desarrolla un voltaje al someterlo a presión o esfuerzo. Las cerámicas PZT se usan mucho en diversas aplicaciones, que incluyen encendedores de gas, generación de ultrasonido y control de vibraciones.
Arreglos atómicos: orden de corto alcance	<i>Iones en vidrio de sílice</i> (SiO_2) sólo tienen orden de corto alcance, donde los iones Si^{+4} y O^{-2} se arreglan de cierta manera: cada Si^{+4} está enlazado con iones 4 O^{-2} en coordinación tetraédrica. Sin embargo, este orden no se mantiene en grandes distancias, y entonces el vidrio de sílice es amorfo. Los vidrios de sílice amorfa, a base de sílice y de otros óxidos metálicos, son la base de toda la industria de comunicaciones por fibras ópticas.

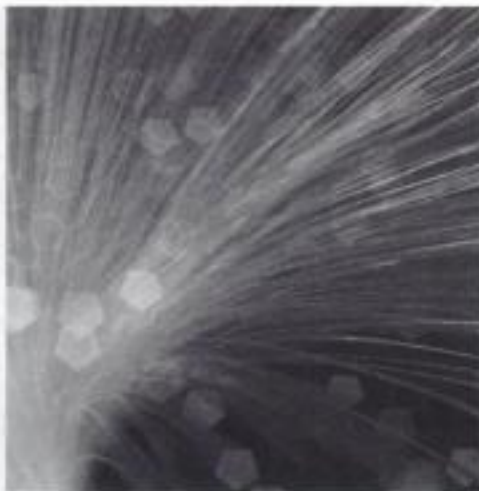


Figura 2-2 Herramientas de corte de diamante. (Cortesía de OSG Tap & Die, Inc.)



$\sim 10^{-10}$ a 10^{-9} m (1 a 10 Å); puede existir ordenamiento hasta en varios cm, en los cristales mayores.

Figura 2-3 Encendedores de gas con base en compuestos piezoeléctricos PZT. Cuando el material piezoeléctrico se somete a un esfuerzo (aplicándole una presión) se produce un voltaje y se forma una chispa entre los electrodos. (Cortesía de Morgan Electro Ceramics, Inc.)



$\sim 10^{-10}$ hasta 10^{-9} m (de 1 a 10 Å)

Figura 2-4 Fibras ópticas basadas en una forma de sílice amorfa. (Cortesía de Corning Incorporated.)

TABLA 2-1 (continuación)

Nivel de estructura	Ejemplo de tecnologías
Nanoestructura	Partículas con nanotamaño (~5 a 10 nm) de óxido de hierro; se usan en ferrofluidos o en imanes líquidos. Estas partículas de óxido de hierro, de nanotamaño, se dispersan en líquidos y se usan comercialmente como ferrofluidos. Una aplicación de esos imanes líquidos es como medio de enfriamiento (transferencia de calor) en los altavoces.
Microestructura	La resistencia mecánica de muchos metales y aleaciones depende mucho del tamaño de grano. Los granos y los límites de grano de la micrografía adjunta de acero son parte de las características microestructurales de este material cristalino. En general, a temperatura ambiente un grano más fino conduce a una resistencia mayor. Muchas propiedades importantes de los materiales son sensibles a la microestructura.
Macroestructura	Recubrimientos relativamente gruesos, como las pinturas en automóviles y otras aplicaciones; se usan no sólo por estética, sino para dar resistencia a la corrosión.

Escala aproximada de longitud

$\sim 10^{-9}$ a 10^{-7} m (1 a 100 nm)

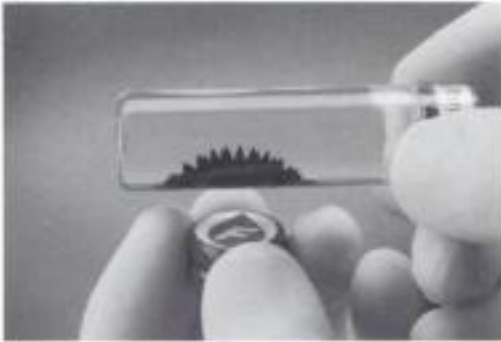


Figura 2-5 Ferrofluido. (Cortesía de Ferro Tec, Inc.)

$\sim 10^{-8}$ a 10^{-6} m (10 nm a 1000 nm)

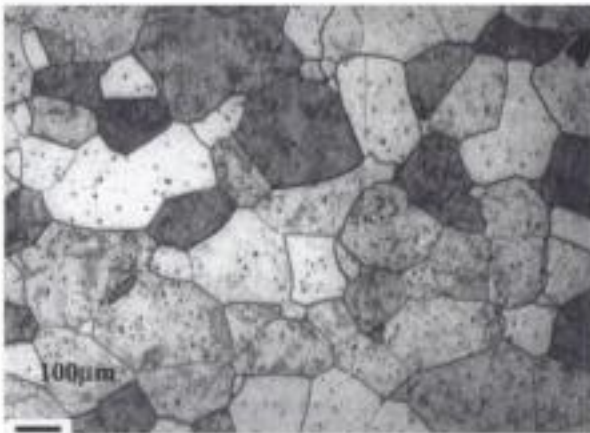


Figura 2-6 Micrografía de acero inoxidable que muestra los granos y los límites de grano. (Cortesía del Dr. Hua y el Dr. Deardo. Universidad de Pittsburgh.)

$\sim 10^{-4}$ nm (1000 nm)



Figura 2-7 Varios recubrimientos orgánicos e inorgánicos protegen al acero del automóvil contra la corrosión y le dan un aspecto agradable. (Cortesía de Ford Motor Company.)

consecuencia, la masa atómica tiene las unidades g/mol. Una unidad alternativa de masa atómica es la **unidad de masa atómica**, uma, que es 1/12 de la masa del carbono 12 (es decir, de un átomo de carbono con 12 protones). Por ejemplo, un mol de hierro contiene 6.02×10^{23} átomos y tiene una masa de 55.847 g, o de 55.847 uma. Los cálculos donde interviene la masa atómica de un material y el número de Avogadro son útiles para comprender más acerca de la estructura de un material. En el ejemplo 2-1 se ilustra la forma de calcular la cantidad de átomos de plata, que es un metal y un buen conductor de la electricidad. Los ejemplos 2-2 y 2-3 ilustran aplicaciones a materiales magnéticos y semiconductores, respectivamente.

EJEMPLO 2-1**Cálculo de la cantidad de átomos de plata**

Calcule la cantidad de átomos en 100 g de plata (Ag).

SOLUCIÓN

La cantidad de átomos se puede calcular a partir de la masa atómica y el número de Avogadro. En el apéndice A se ve que la masa atómica (o peso atómico) de la plata es 107.868 g/mol. La cantidad de átomos es:

$$\begin{aligned}\text{Cantidad de átomos de Ag} &= \frac{(100\text{g})(6.023 \times 10^{23} \text{ átomos/mol})}{107.868 \text{ g/mol}} \\ &= 5.58 \times 10^{23}\end{aligned}$$

EJEMPLO 2-2**Partículas de hierro-platino de nanotamaños para almacenamiento de información**

Los científicos están considerando el uso de nanopartículas de materiales magnéticos tales como el hierro-platino (Fe-Pt) como medio de almacenamiento de datos con densidades ultraaltas. Los arreglos de esas partículas tienen el potencial de almacenar billones de bits de datos por pulgada cuadrada, capacidad que será de 10 a 100 veces mayor que la de cualquier otro dispositivo, como puede ser un disco duro de computadora. Si esos científicos quisieran usar partículas de hierro (Fe) de 3 nm de diámetro ¿cuál sería la cantidad de átomos en una de esas partículas?

SOLUCIÓN

En un capítulo posterior sobre materiales magnéticos, el lector aprenderá que esas partículas, que se usan en medios de grabación, tienden a ser aciculares (en forma de agujas). Por ahora supondremos que esas partículas magnéticas tienen forma esférica.

El radio de una partícula es 1.5 nm.

$$\begin{aligned}\text{Volumen de cada nanopartícula magnética de hierro} &= (4/3)\pi(1.5 \times 10^{-7} \text{ cm})^3 \\ &= 1.4137 \times 10^{-20} \text{ cm}^3\end{aligned}$$

Densidad del hierro = 7.8 g/cm³. La masa atómica del hierro es 56 g/mol.

$$\begin{aligned}\text{Masa de cada nanopartícula de hierro} &= 7.8 \text{ g/cm}^3 \times 1.4137 \times 10^{-20} \text{ cm}^3 \\ &= 1.102 \times 10^{-19} \text{ g.}\end{aligned}$$

Un mol o 56 g de Fe contiene 6.023×10^{23} átomos; en consecuencia, la cantidad de átomos en una nanopartícula de Fe será $6.023 \times 10^{23} / \text{g mol} \times (1.102 \times 10^{-19} \text{ g} / 56 \text{ g/mol}) = 1186$. Es una cantidad muy pequeña de átomos, comparada con la cantidad de átomos en una partícula de hierro de 10 micrómetros de diámetro. Esas partículas mayores de hierro se suelen usar en cereales para el desayuno, tabletas de vitaminas y otras aplicaciones.

$3s^1$	electrón 11	$n = 3, l = 0, m_l = 0, m_s = +\frac{1}{2} \text{ o } -\frac{1}{2}$
$2p^6$	electrón 10	$n = 2, l = 1, m_l = +1, m_s = -\frac{1}{2}$
	electrón 9	$n = 2, l = 1, m_l = +1, m_s = +\frac{1}{2}$
	electrón 8	$n = 2, l = 1, m_l = 0, m_s = -\frac{1}{2}$
	electrón 7	$n = 2, l = 1, m_l = 0, m_s = +\frac{1}{2}$
	electrón 6	$n = 2, l = 1, m_l = -1, m_s = -\frac{1}{2}$
	electrón 5	$n = 2, l = 1, m_l = -1, m_s = +\frac{1}{2}$
$2s^2$	electrón 4	$n = 2, l = 0, m_l = 0, m_s = -\frac{1}{2}$
	electrón 3	$n = 2, l = 0, m_l = 0, m_s = +\frac{1}{2}$
$1s^2$	electrón 2	$n = 1, l = 0, m_l = 0, m_s = -\frac{1}{2}$
	electrón 1	$n = 1, l = 0, m_l = 0, m_s = +\frac{1}{2}$

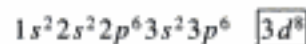
Figura 2-9 El conjunto completo de números cuánticos de cada uno de los 11 electrones del sodio.

TABLA 2-2 ■ Pauta para asignar electrones a niveles de energía

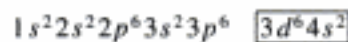
	$l = 0$ (s)	$l = 1$ (p)	$l = 2$ (d)	$l = 3$ (f)	$l = 4$ (g)	$l = 5$ (h)
$n = 1$ (K)	2					
$n = 2$ (L)	2	6				
$n = 3$ (M)	2	6	10			
$n = 4$ (N)	2	6	10	14		
$n = 5$ (O)	2	6	10	14	18	
$n = 6$ (P)	2	6	10	14	18	22

Nota: 2, 6, 10, 14, ..., indican la cantidad de electrones en el nivel de energía.

Desviaciones de las estructuras electrónicas esperadas No siempre se sigue la construcción ordenada de la estructura electrónica, en especial cuando el número atómico es grande y se comienzan a llenar los niveles d y f . Por ejemplo, cabría esperar que la estructura electrónica del hierro, de número atómico 26, fuera:



Sin embargo, la estructura real es:



El nivel $3d$ que queda sin llenar es el que causa el comportamiento magnético del hierro, como se verá en el capítulo 19.

Valencia La **valencia** de un átomo es la cantidad de electrones de un átomo que participan en el enlace o en reacciones químicas. En general, la valencia es la cantidad de electrones en los niveles de energía externos s y p . La valencia de un átomo se relaciona con su habilidad para participar en una combinación química con otros elementos. Algunos ejemplos de valencia son:



La valencia también depende del ambiente inmediato que rodee al átomo o de los átomos vecinos disponibles para enlazarse. El fósforo tiene una valencia de cinco cuando se combina con el oxígeno. Pero la valencia del fósforo sólo es tres: los electrones en el nivel $3p$, cuando reacciona con el hidrógeno. ¡El manganeso puede tener valencias de 2, 3, 4, 6 o 7!

Estabilidad atómica y electronegatividad Si un átomo tiene valencia cero, el elemento es inerte (no es reactivo). Un ejemplo de este caso es el argón, que tiene la estructura electrónica:



Otros átomos prefieren comportarse como si sus niveles externos s y p estuvieran totalmente llenos, con ocho electrones, o completamente vacíos. El aluminio tiene tres electrones en sus niveles externos s y p . Un átomo de aluminio cede con facilidad sus tres electrones externos, y quedan vacíos sus niveles $3s$ y $3p$. El enlazamiento atómico y el comportamiento químico del aluminio están determinados por el mecanismo de interacción de esos electrones con los átomos que los rodean.

Por otra parte, el cloro contiene siete electrones en los niveles externos $3s$ y $3p$. La reactividad del cloro se debe a su aptitud de llenar su nivel externo de energía aceptando un electrón.

La **electronegatividad** describe la tendencia de un átomo para ganar o aceptar un electrón. Los átomos con los niveles de energía externos casi totalmente llenos, como el cloro, son fuertemente electronegativos y aceptan electrones con facilidad. Sin embargo, los átomos con niveles externos casi vacíos, como el sodio, ceden con facilidad electrones y tienen baja electronegatividad. Los elementos con número atómico grande también tienen baja electronegatividad, porque los electrones externos están a mayor distancia del núcleo positivo, por lo que no son atraídos con tanta fuerza al átomo. En la figura 2-10 se muestran las electronegatividades para algunos elementos. En el ejemplo 2-4 se ilustra una comparación de estructuras electrónicas con lo que acabamos de aprender acerca de la electronegatividad. Los elementos con baja electronegatividad, es decir, <2.0 a veces se llaman electropositivos.

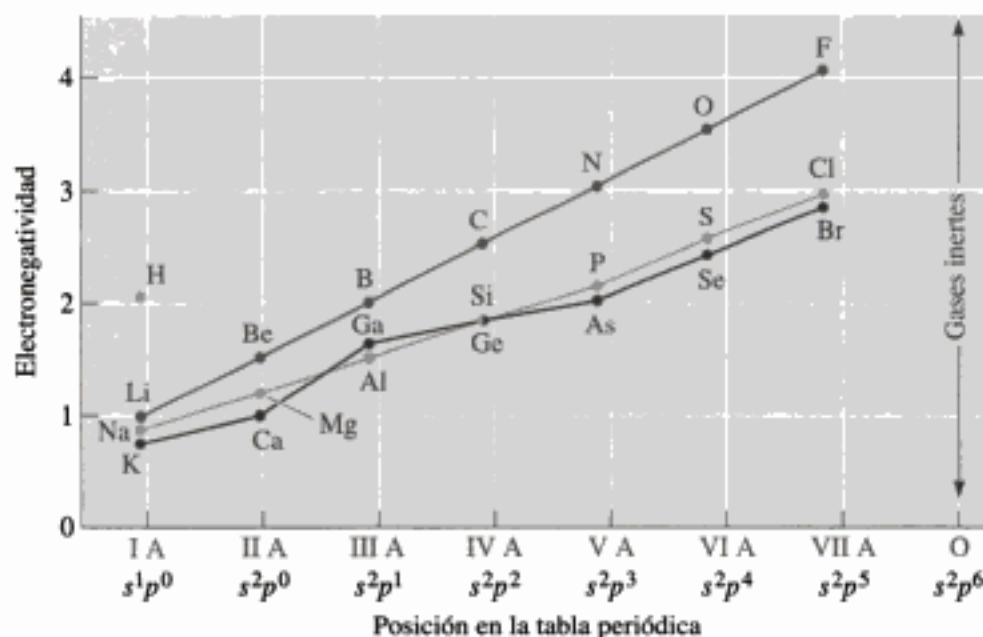


Figura 2-10 Electronegatividades de algunos elementos en función de su posición en la tabla periódica.

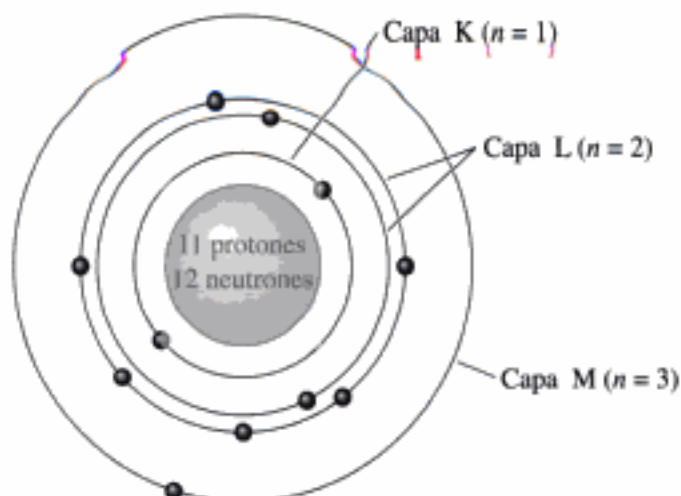


Figura 2-8 Estructura atómica del sodio, número atómico 11. Muestra los electrones en las capas cuánticas K, L y M.

1. Al número cuántico principal n se le asignan valores enteros 1, 2, 3, 4, 5, ... que indican la capa cuántica a la que pertenece el electrón (Fig. 2-8). Una **capa cuántica** es un conjunto de niveles de energía fijos a los que pertenece cada electrón. A cada electrón de la capa se le designa con cuatro números cuánticos.

A las capas cuánticas también se les asigna una letra respectiva; a la capa en que $n = 1$ se llama K, para $n = 2$ es L, para $n = 3$ es M, y así sucesivamente.

2. La cantidad de niveles de energía en cada capa cuántica está determinada por el **número cuántico azimutal** l y por el **número cuántico magnético** m_l . El número cuántico magnético describe el número de niveles de energía para cada número cuántico azimutal. A los números cuánticos azimutales también se les asignan números: $l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$. Si $n = 2$, entonces hay también dos números cuánticos azimutales: $l = 0$ y $l = 1$. Los números cuánticos azimutales se representan con letras minúsculas:

$$\begin{array}{ll} s \text{ para } l = 0 & d \text{ para } l = 2 \\ p \text{ para } l = 1 & f \text{ para } l = 3. \end{array}$$

3. El número cuántico magnético m_l expresa la cantidad de niveles de energía u orbitales para cada número cuántico azimutal. La cantidad total de números cuánticos magnéticos para cada l es $2l + 1$. A los valores de m_l se les asignan números enteros entre $-l$ y $+l$. Para $l = 2$, hay $2(2) + 1 = 5$ números cuánticos magnéticos, cuyos valores son $-2, -1, 0, +1$ y $+2$.
4. El **principio de exclusión de Pauli** indica que en un orbital no pueden estar presentes más de dos electrones, con giros electrónicos opuestos. La figura 2-9 muestra los números cuánticos y los niveles de energía de cada electrón en un átomo de sodio.

La notación abreviada que frecuentemente se usa para indicar la estructura electrónica de un átomo combina el valor numérico del número cuántico principal, la notación en minúsculas para el número cuántico azimutal y un superíndice que indica la cantidad de electrones en cada orbital. La notación abreviada para el germanio, cuyo número atómico es 32, es

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2$$

Las configuraciones electrónicas de los elementos se resumen en el apéndice C; los niveles de energía se resumen en la tabla 2-2.

EJEMPLO 2-3

Concentración de dopante en cristales de silicio

Los monocristales de silicio se usan mucho para fabricar *chips* de computadora. Calcule la *concentración* de átomos de silicio en el silicio, es decir, la cantidad de átomos de silicio por unidad de volumen de silicio. Durante el crecimiento de los monocristales de silicio, con frecuencia se introducen átomos de otros elementos (llamados **dopantes**) en forma deliberada, para controlar y cambiar la conductividad y otras propiedades eléctricas del silicio. Uno de esos dopantes es el fósforo (P), que se agrega para fabricar cristales semiconductores de tipo *n* de silicio. Suponga que la concentración que se requiere en un cristal de silicio es 10^{17} átomos de P/cm³. Compare las concentraciones de los átomos en el silicio y la concentración de átomos de P. ¿Qué importancia tienen esos números desde el punto de vista tecnológico? Suponga que la densidad del silicio es 2.33 g/cm³.

SOLUCIÓN

Primero se debe calcular la cantidad de átomos de silicio por unidad de volumen. En la tabla periódica de los elementos (Fig. 2-11), se ve que la masa atómica del silicio es 28.09 g/mol. Esto es, 28.09 g de silicio contienen 6.023×10^{23} átomos. En consecuencia, 2.33 g de silicio contienen $(2.33 \times 6.023 \times 10^{23} / 28.09)$ átomos = 4.99×10^{22} átomos. También se sabe que la masa de un cm³ de Si es 2.33 g. Entonces, la concentración de átomos de silicio en el silicio puro es $\sim 5 \times 10^{22}$ átomos/cm³.

Importancia de comparar las concentraciones atómicas del dopante y del Si: si es necesario agregar fósforo (P) a este cristal en forma tal que la concentración de P sea 10^{17} átomos/cm³, la relación de concentración de átomos en el silicio entre la de P será $5 \times 10^{22} / 10^{17} = 5 \times 10^5$. Esto significa que ¡sólo uno de cada 500 000 átomos del cristal dopado será de fósforo (P)! ¡Equivale a tener una manzana en 500 000 naranjas! Esto explica la razón de que los monocristales de silicio deben ser de pureza excepcional, y al mismo tiempo deben tener concentraciones muy pequeñas y uniformes de dopantes. Los científicos e ingenieros en materiales han desarrollado la tecnología para el crecimiento de cristales grandes y de alta pureza de silicio y otros materiales.

2-3

La estructura electrónica del átomo

Los electrones ocupan niveles de energía discretos dentro del átomo. Cada electrón posee determinada energía, y no puede haber más de dos electrones en cada átomo que tengan la misma energía. Eso también implica que haya una diferencia discreta de energía entre dos niveles de energía cualquiera.

Números cuánticos El nivel de energía al cual pertenece cada electrón se determina con cuatro **números cuánticos**. Los números cuánticos son aquellos que asignan electrones a niveles discretos de energía en un átomo: el número cuántico principal *n*, el número cuántico azimutal *l*, el número cuántico magnético *m_l* y el número cuántico espín o de giro *m_s*. Los números cuánticos azimutales describen los niveles de energía en cada capa cuántica. El **número cuántico de giro o espín** (*m_s*) tiene los valores asignados +1/2 y -1/2, y refleja distintos giros del electrón.

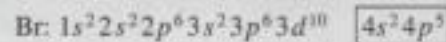
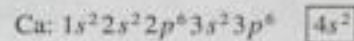
La cantidad posible de niveles de energía se determina con los tres primeros números cuánticos.

EJEMPLO 2-4**Comparación de electronegatividades**

Use las estructuras electrónicas para comparar las electronegatividades del calcio y del bromo.

SOLUCIÓN

Las estructuras atómicas obtenidas en el apéndice C son:



El calcio tiene dos electrones en su orbital externo $4s$, y el bromo tiene siete electrones en su orbital externo $4s4p$. El calcio, con una electronegatividad de 1.0, tiende a ceder electrones y tiene baja electronegatividad. Pero el bromo, con una electronegatividad de 2.8, tiende a aceptar electrones y es fuertemente electronegativo. Esta diferencia en valores de electronegatividad indica que estos elementos pueden reaccionar entre sí con rapidez para formar un compuesto.

24**La tabla periódica**

La tabla periódica contiene información valiosa acerca de elementos específicos, y también puede ayudar a identificar tendencias en tamaño de los átomos, puntos de fusión, reactividad química y otras propiedades. La conocida tabla periódica (Fig. 2-11) se forma de acuerdo con la estructura electrónica de los elementos. No todos los elementos de la tabla periódica se encuentran en la naturaleza. Las filas en la tabla periódica corresponden a capas cuánticas, o números cuánticos principales. Las columnas suelen indicar la cantidad de electrones en los niveles s y p externos de energía, y corresponden a la valencia más común. En ingeniería, lo que interesa más es lo siguiente:

- a) polímeros (plásticos) a base principalmente de carbono, que aparece en el grupo 4B;
- b) cerámicos, normalmente basados en combinaciones de muchos elementos de los grupos 1 a 5B, con elementos como oxígeno, carbono y nitrógeno; y
- c) materiales metálicos, basados comúnmente en elementos de los grupos 1, 2 y en los elementos metálicos de transición.

Muchos semiconductores de importancia tecnológica están en el grupo 4B, como por ejemplo el silicio (Si), el diamante (C) y el germanio (Ge). Los semiconductores también pueden ser combinaciones de elementos de los grupos 2B y 6B, como el seleniuro de cadmio (CdSe), formado por el cadmio (Cd) del grupo 2 y el selenio (Se), del grupo 6. Se llaman **semiconductores II-VI** (dos-seis). En forma parecida, el arseniuro de galio (GaAs) es un **semiconductor III-V** (tres-cinco) formado por galio (Ga) del grupo 3B, y el arsénico (As) del grupo 5B. Muchos **elementos de transición**, como el titanio (Ti), el vanadio (V), el hierro (Fe), el níquel (Ni), el cobalto (Co), etc., son especialmente útiles como materiales magnéticos y ópticos por su configuración electrónica que les permite tener múltiples valencias.

Tendencias en las propiedades La tabla periódica contiene un cúmulo de información útil, como masa atómica, número atómico de distintos elementos, etc. También muestra las

1																	2
1A																	2A
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2
1																	2

Figura 2-11 Tabla periódica de los elementos.

tendencias que hay en tamaño atómico, puntos de fusión y reactividad química. Por ejemplo, el carbono (en su forma de diamante) tiene el mayor punto de fusión, 3550 °C. Los puntos de fusión de los elementos debajo del carbono van disminuyendo: 1410 °C del silicio (Si), 937 °C del germanio (Ge), 232 °C del estaño (Sn) y 327 °C del plomo (Pb). Obsérvese que la temperatura de fusión del Pb es mayor que la del Sn. Se puede llegar a la conclusión de que se trata de tendencias y no de variaciones exactas de propiedades.

A partir de la tabla periódica, también se pueden reconocer tendencias en otras propiedades. El diamante (carbono), un elemento del grupo 4B, es un material con una brecha muy grande entre bandas (es decir, no es un conductor de electricidad muy bueno). Esto es consistente con el hecho de que tenga el mayor punto de fusión entre los elementos del grupo 4B, lo que sugiere que las fuerzas interatómicas son grandes (véase la sección 2-6). Al bajar por esa columna, la brecha entre bandas disminuye; las del silicio y el germanio son 1.11 y 0.67 eV, respectivamente. Al bajar todavía más por la columna 4, se observa que una forma del estaño es semiconductora y otra es metálica. Si se observa el grupo 1A, se ve que el litio es muy **electropositivo**, es decir, es un elemento cuyos átomos tienden a participar en interacciones químicas donando electrones y, en consecuencia, es muy reactivo. De igual manera, al bajar por la columna 1A se puede observar que la reactividad química de los elementos disminuye.

Así, la tabla periódica muestra información útil acerca de fórmulas, números atómicos y masas atómicas de los elementos. También ayuda a pronosticar o a racionalizar las tendencias en las propiedades de los elementos y los compuestos. Es la causa de la gran utilidad que tiene la tabla periódica para los científicos y los ingenieros.

2-5

Enlazamiento atómico

Hay cuatro mecanismos importantes mediante los cuales los átomos se enlazan, o unen en los materiales. Son:

1. el enlace metálico,
2. el enlace covalente,
3. el enlace iónico y
4. el enlace de van der Waals.

En los tres primeros mecanismos, el enlazamiento se establece cuando los átomos llenan sus niveles *s* y *p* externos. Estos enlaces son relativamente fuertes y se les llama **enlaces primarios** (enlaces relativamente fuertes entre átomos adyacentes, resultado de transferir o compartir electrones de los orbitales externos). Los enlaces de van der Waals son enlaces secundarios, causados por un mecanismo diferente y son relativamente débiles. A continuación describiremos cada uno de estos tipos de enlace.

El enlace metálico Los elementos metálicos tienen átomos más electropositivos, los cuales donan o ceden sus electrones de valencia para formar un “mar o nube” de electrones que rodea a esos átomos (Fig. 2-12). Por ejemplo, el aluminio cede sus tres electrones de valencia y queda un centro formado por el núcleo y los electrones internos. Ese centro tiene carga positiva, porque le faltan tres electrones con carga negativa. Los electrones de valencia, o externos, se mueven libremente en el mar de electrones y se asocian con las partes centrales de varios átomos. Estos centros iónicos con carga positiva se mantienen unidos por atracción mutua hacia el electrón; de este modo, se produce un fuerte enlace metálico.

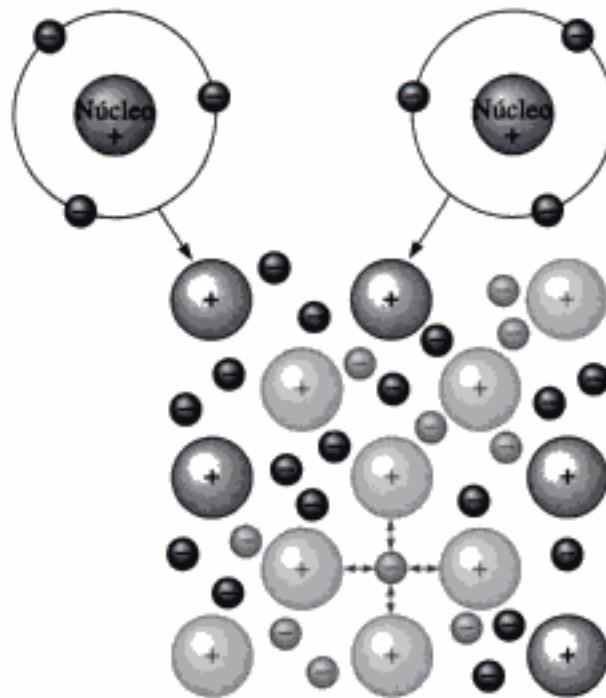


Figura 2-12 El enlace metálico se forma cuando los átomos ceden sus electrones de valencia, que pasan a formar un mar de electrones. Los núcleos de los átomos, con cargas positivas, quedan enlazados por atracción mutua hacia los electrones con carga negativa.

Como sus electrones de valencia no están fijos en alguna posición, la mayoría de los metales puros son buenos conductores de la electricidad a temperaturas relativamente bajas ($\sim T < 300 \text{ K}$). Bajo la influencia de un voltaje aplicado, los electrones de valencia se mueven (Fig. 2-13), causando el paso de la corriente, si el circuito está cerrado. En el ejemplo 2-5 se investiga la conductividad y los electrones de valencia de la plata.

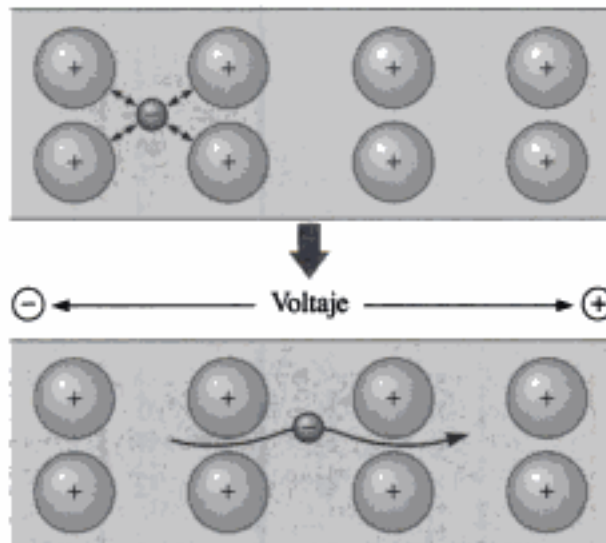


Figura 2-13 Cuando se aplica voltaje a un metal, los electrones del mar de electrones se mueven con facilidad y conducen una corriente.

EJEMPLO 2-5**Cálculo de la conductividad de la plata**

Calcule la cantidad de electrones capaces de conducir la carga eléctrica en diez centímetros cúbicos de plata.

SOLUCIÓN

La valencia de la plata es uno, y sólo se espera que los electrones de valencia conduzcan la carga eléctrica. En el apéndice A se ve que la densidad de la plata es 10.49 g/cm^3 . La masa atómica de la plata es 107.868 g/mol .

$$\text{Masa de } 10 \text{ cm}^3 \text{ de plata} = (10 \text{ cm}^3)(10.49 \text{ g/cm}^3) = 104.9 \text{ g}$$

$$\text{Cantidad de átomos} = \frac{(104.9 \text{ g})(6.023 \times 10^{23} \text{ átomos/mol})}{107.868 \text{ g/mol}} = 5.85 \times 10^{23}$$

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de electrones} &= (5.85 \times 10^{23} \text{ átomos})(1 \text{ electrón de valencia/átomo}) \\ &= 5.85 \times 10^{23} \text{ electrones de valencia/átomo por cada } 10 \text{ cm}^3. \end{aligned}$$

Los materiales con enlace metálico tienen un módulo de Young (o módulo de elasticidad) relativamente alto, porque los enlaces son fuertes. Los metales también tienen buena ductilidad, porque los enlaces metálicos no son direccionales. Hay otras razones importantes relacionadas con la microestructura que pueden explicar por qué los metales tienen, en realidad, *menores resistencias y mayor ductilidad* que las que podrían esperarse por su tipo de enlace. La **ductilidad** es la capacidad que tienen los materiales de ser estirados o doblados sin romperse. Describiremos estos conceptos con más detalle en el capítulo 6. En general, los puntos de fusión de los metales son relativamente altos. Desde el punto de vista de las propiedades ópticas, son buenos reflectores de la radiación visible. Debido a su carácter electropositivo, muchos metales como el hierro tienden a sufrir corrosión y oxidación. Muchos metales puros son buenos conductores de calor, y se usan muy bien en diversas aplicaciones para transferencia de calor. Se debe destacar que el enlazamiento metálico es *uno de los factores* para tratar de racionalizar las tendencias de las propiedades que se observan en los materiales metálicos. Como veremos en algunos de los siguientes capítulos, hay otros factores relacionados con la microestructura que también desempeñan un papel básico para determinar las propiedades de los materiales metálicos.

El enlace covalente Los materiales con **enlace o enlazamiento covalente** se caracterizan porque los enlaces se forman compartiendo los electrones de valencia entre dos o más átomos. Por ejemplo, un átomo de silicio, que tiene valencia cuatro, llena su capa externa con ocho electrones, compartiendo los propios con otros cuatro de átomos cercanos de silicio (Fig. 2-14). Cada uno de los casos en que se comparten electrones representa un enlace covalente; así, cada átomo de silicio está enlazado a cuatro átomos vecinos por cuatro enlaces covalentes. Para que se formen los enlaces covalentes, los átomos de silicio se deben orientar de tal manera que los enlaces tengan una **relación direccional** específica entre sí. Se forma una relación direccional cuando los enlaces entre los átomos de un material con enlace covalente forman ángulos específicos, que dependen del material. En el caso del silicio, este arreglo produce un tetraedro, con ángulos de 109.5° entre los enlaces covalentes (Fig. 2-15).

Los enlaces covalentes son muy fuertes. En consecuencia, los materiales con enlace covalente son muy resistentes y duros. Por ejemplo, el diamante (C), el carburo de silicio (SiC), el nitruro de silicio (Si_3N_4) y el nitruro de boro (BN) tienen enlace covalente. Estos materiales también tienen puntos de fusión muy altos, lo que significa que pueden ser útiles

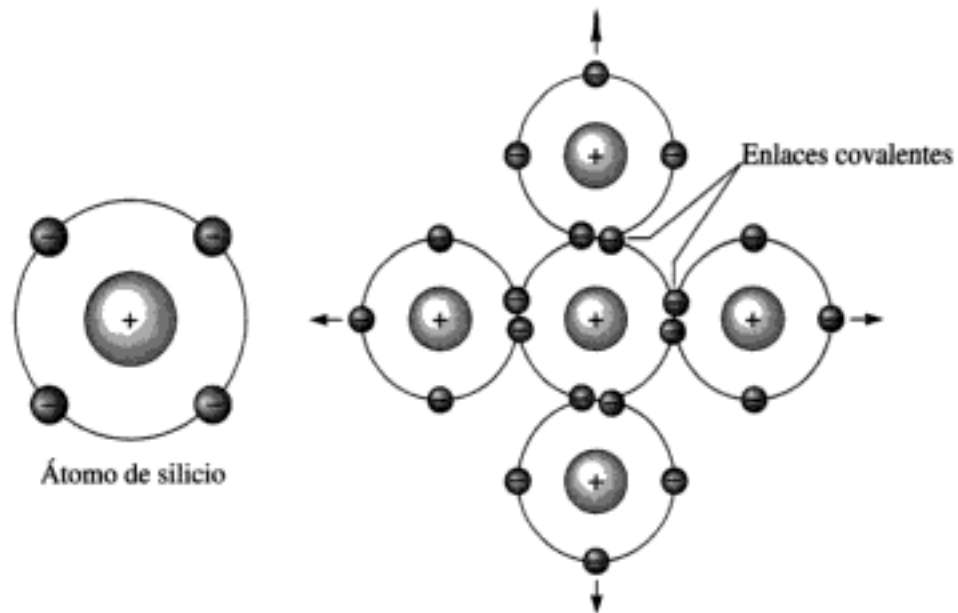


Figura 2-14 El enlazamiento covalente requiere que los electrones se compartan entre los átomos, de forma tal que cada átomo tenga lleno su orbital externo sp . En el silicio, con una valencia de cuatro, se deben formar cuatro enlaces covalentes.

en aplicaciones de alta temperatura. Por otro lado, la resistencia térmica de esos materiales es un desafío al procesarlos. Los materiales con este tipo de enlace suelen tener ductilidad reducida a causa de la direccionalidad de los enlaces. La conductividad eléctrica de muchos materiales enlazados en forma covalente (como silicio, diamante y muchos cerámicos) no es alta, porque los electrones de valencia están fijos en los enlaces entre átomos, y no están disponibles con facilidad para la conducción. En algunos de esos materiales, como el Si, se pueden obtener valores útiles y controlados de conductividad eléctrica introduciendo, en forma deliberada, pequeñas concentraciones de otros elementos, llamados dopantes. Los polímeros conductores también son un buen ejemplo de materiales con enlace covalente que pueden convertirse en semiconductores.[3] El desarrollo de polímeros conductores, por lo ligeros que son, ha captado la atención de muchos científicos e ingenieros, para desarrollar componentes electrónicos flexibles.

No se puede predecir fácilmente si un material de éstos tendrá resistencia alta o baja, si será dúctil o frágil, tan sólo con base en la naturaleza de su tipo de enlace. Se necesita más información sobre las estructuras atómica, microscópica y macroscópica del material. Sin embargo, la naturaleza del enlace sí apunta hacia una tendencia en materiales con ciertas clases de enlace y composiciones químicas. En el ejemplo 2-6 se investiga cómo se forma uno de estos enlaces entre oxígeno y silicio para formar la sílice.

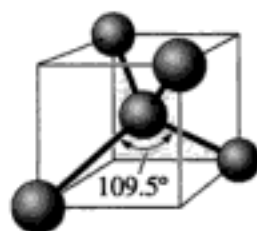


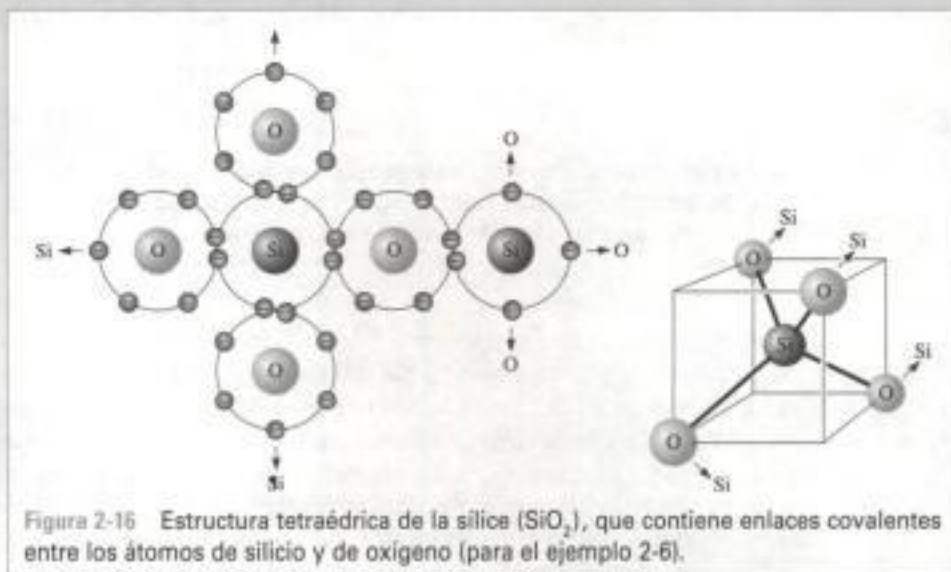
Figura 2-15 Los enlaces covalentes son direccionales. En el silicio se forma una estructura tetraédrica con ángulos de 109.5° que se requieren entre cada enlace covalente.

EJEMPLO 2-6**¿Cómo se unen los átomos de oxígeno y silicio para formar la sílice?**

Suponiendo que la sílice (SiO_2) tiene un enlace 100% covalente, describa cómo están unidos los átomos de oxígeno y silicio que la forman.

SOLUCIÓN

El silicio tiene valencia cuatro, y comparte electrones con cuatro átomos de oxígeno; lo que da un total de ocho electrones por cada átomo de silicio. Sin embargo, el oxígeno tiene valencia seis, y comparte electrones con dos átomos de silicio para que el oxígeno tenga un total de ocho electrones. La figura 2-16 muestra una de las estructuras posibles de la sílice. También se produce una estructura tetraédrica como la del silicio (Si). Después, en este capítulo, describiremos cómo tener en cuenta la naturaleza iónica y covalente del enlazamiento en la sílice.

**EJEMPLO 2-7****Diseño de un termistor**

Un **termistor** es un dispositivo para medir temperaturas que aprovecha el cambio de conductividad eléctrica que se produce cuando cambia la temperatura. Seleccione un material que pueda servir como termistor en el intervalo de temperaturas de 500 a 1000 °C (véase la Fig. 2-17).

SOLUCIÓN

Se puede hacer que la resistencia de un termistor aumente o disminuya al aumentar la temperatura. Hay termistores que se conocen como de coeficiente térmico positivo de la resistencia o de coeficiente térmico negativo de la resistencia, respectivamente. El hecho de que un termistor cambie su resistencia como respuesta a un cambio de temperatura se aprovecha para controlar la temperatura o conmutar (encender o apagar) la operación de un circuito eléctrico cuando algún aparato (por ejemplo, refrigerador, secadora de cabello, horno o reactor) llega a cierta temperatura.



Figura 2-17 Fotografía de un termistor disponible en el mercado (para el 28p7.039 2-7). (Cortesía de Vishay Intertechnology, Inc.)

Se deben satisfacer dos requisitos en el diseño. Primero, se debe seleccionar un material con alto punto de fusión. Segundo, la conductividad eléctrica del material debe presentar un cambio sistemático y reproducible, que sea función de la temperatura. Pueden ser adecuados los materiales con enlaces covalentes; con frecuencia tienen altas temperaturas de fusión y, a medida que se rompen más enlaces covalentes al aumentar la temperatura, hay cada vez más electrones disponibles para transferir la carga eléctrica.

El silicio semiconductor es una opción: se funde a 1410°C y tiene enlaces covalentes. Varios materiales cerámicos también tienen altos puntos de fusión y se comportan como materiales semiconductores. El silicio se debe proteger contra la oxidación. Debemos asegurar que los cambios de conductividad sean realmente aceptables dentro del intervalo de temperatura. Algunos termistores que muestran un decremento predecible de resistencia al aumentar la temperatura se hacen con materiales semiconductores.

Los polímeros *no* serían adecuados, aun cuando el principal enlace en ellos sea covalente; se debe a sus temperaturas de fusión o de descomposición, que son relativamente bajas. Muchos termistores que se pueden usar en aplicaciones de conmutación usan formulaciones a base de titanato de bario (BaTiO_3). Otros muchos materiales de coeficiente térmico negativo de resistencia se basan en Fe_3O_4 - ZnCr_2O_4 , óxido ferroso férrico y cromato de zinc; Fe_3O_4 - MgCr_2O_4 , óxido ferroso férrico y cromato de magnesio; o Mn_3O_4 , óxido manganoso, dopado con Ni, Co o Cu.[4]

En casi cualquier caso de diseño, una vez cumplidos los criterios técnicos de funcionamiento, siempre se debe prestar atención y tener en cuenta el costo de las materias primas, así como otros factores importantes, como la duración. En algunas aplicaciones, también se debe atender más el impacto ambiental, incluyendo la posibilidad de reciclar los materiales.

El enlace iónico Cuando en un material está presente más de una clase de átomos, unos pueden donar sus electrones de valencia a otros distintos, para llenar la capa externa de energía de la segunda clase de átomos. Los dos átomos tienen entonces llenos (o vacíos) sus niveles externos de energía, pero los dos han adquirido una carga eléctrica y se comportan como iones. El átomo que aporta los electrones queda con una carga positiva neta y se llama **catión** (por ser atraído hacia el cátodo) mientras que el átomo que acepta los electrones adquiere una carga negativa neta y se llama **anión** (es atraído hacia el ánodo). Entonces, los iones con carga opuesta

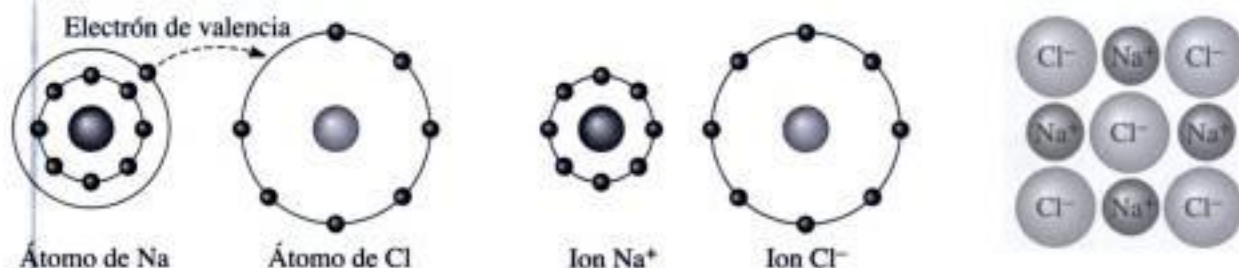


Figura 2-18 Un enlace iónico se forma entre dos átomos diferentes con distintas electronegatividades. Cuando el sodio cede su electrón de valencia al cloro, ambos se transforman en iones; se desarrolla una atracción y se forma un enlace iónico.

son atraídos entre sí y producen el **enlace iónico**. Por ejemplo, la atracción entre los iones de cloruro y los de sodio (Fig. 2-18) produce el cloruro de sodio (NaCl), que es la sal de mesa.

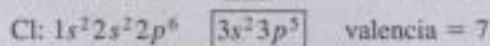
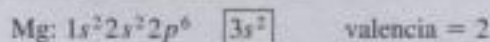
EJEMPLO 2-8

Descripción del enlace iónico entre magnesio y cloro

Describe el enlace iónico entre el magnesio y el cloro.

SOLUCIÓN

Las estructuras electrónicas y las valencias son:



Cada átomo de magnesio cede sus dos electrones de valencia y se transforma en un ion Mg^{2+} , o Mg^{++} . Cada átomo de cloro acepta un electrón y se transforma en un ion Cl^- . Para satisfacer el enlazamiento iónico debe haber doble cantidad de iones cloruro que de iones magnesio, y se forma el compuesto MgCl_2 .

Los sólidos que tienen considerable enlazamiento iónico son también, con frecuencia, resistentes, debido a la fuerza de los enlaces. La conductividad eléctrica de estos sólidos con frecuencia es muy limitada. Una gran parte de la corriente eléctrica se transfiere a través del movimiento de iones (Fig. 2-19). Debido a su tamaño, los iones no suelen moverse con tanta facilidad como los electrones. Sin embargo, en muchas aplicaciones técnicas se aprovecha la conducción eléctrica debida al movimiento de iones causada por mayor temperatura, gradiente de potencial químico o una fuerza motriz electroquímica. Entre los ejemplos, están las baterías de iones de litio, donde se usan óxido de litio y cobalto, o los recubrimientos conductores de óxido de indio y estaño, para el vidrio de las pantallas sensibles al tacto; también se usan en celdas de combustible sólidas de óxido, basadas en formulaciones de circonia (o zirconia, ZrO_2).



Figura 2-19 Cuando se aplica voltaje a un material iónico, se deben mover los iones completos para que la corriente pueda pasar. El movimiento de los iones es lento, y la conductividad eléctrica es pobre (para el ejemplo 2-8).

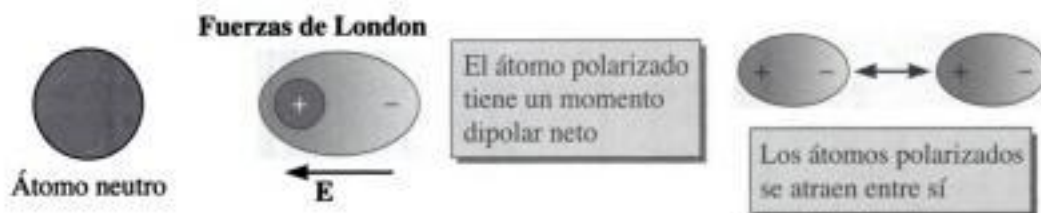


Figura 2-20 Ilustración de las fuerzas de London, que son una clase de fuerza de van der Waals entre átomos.

Enlace de van der Waals El origen de las fuerzas de van der Waals entre átomos y moléculas es de naturaleza mecánica cuántica, y está fuera del alcance de este libro el explicarlas completamente; aquí presentaremos un cuadro simplificado. Si dos cargas eléctricas $+q$ y $-q$ están separadas una distancia d , el momento dipolar se define como $q \times d$. Los átomos son eléctricamente neutros; también, los centros de la carga positiva (núcleos) y la carga negativa (nube de electrones) coinciden en un lugar. En consecuencia, un átomo neutro no tiene momento dipolar. Cuando un átomo neutro está expuesto a un campo eléctrico interno o externo, se polariza, es decir, se separan los centros de carga positiva y negativa. Esto crea o induce un momento dipolar (Fig. 2-20). En algunas moléculas no es necesario inducir el momento dipolar, ya que existe en virtud de la dirección de los enlaces y de la naturaleza de los átomos. A estas moléculas se les llama **moléculas polares**. Ejemplo de una molécula que tiene un momento dipolar incorporado en forma permanente es la del agua (Fig. 2-21).

Las moléculas o los átomos que tienen un momento dipolar inducido o permanente se atraen entre sí. La fuerza de atracción se llama fuerza de van der Waals. Estas fuerzas de van der Waals entre átomos y moléculas tienen su origen en interacciones entre dipolos inducidos o, en algunos casos, en interacciones entre dipolos permanentes que hay en ciertas moléculas polares. Lo que caracteriza a esas fuerzas es que existen en todos los materiales.

Hay tres clases de interacciones de **van der Waals**, que son las fuerzas de London, de Keesom y de Debye. Si las interacciones son entre dos dipolos inducidos en átomos o moléculas, se llaman **fuerzas de London**, como por ejemplo, en el tetracloruro de carbono (Fig. 2-20). Cuando un dipolo inducido (esto es, un dipolo que se induce en lo que de otra manera sería un átomo o una molécula no polar) interacciona con una molécula que tiene dipolo permanente, se trata de una **interacción de Debye**. Un ejemplo de interacción de Debye serían las fuerzas entre moléculas de agua y moléculas de tetracloruro de carbono.

Si las interacciones son entre moléculas polares en forma permanente (por ejemplo, moléculas de agua que se atraen entre sí o que atraen a otras moléculas polares) se les llama **interacciones de Keesom**. La atracción entre las regiones con carga positiva de una molécula de agua y las de carga negativa de una segunda molécula de agua forma un enlace de atracción entre ambas (Fig. 2-21).

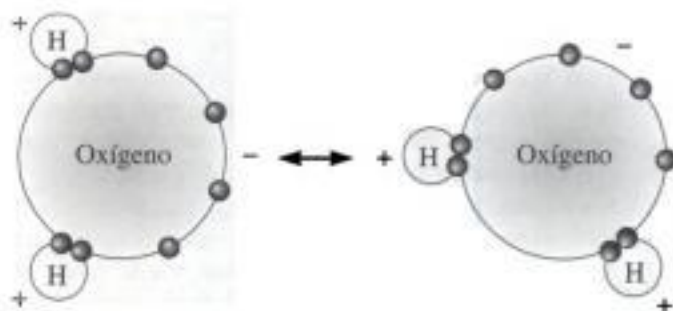


Figura 2-21 Las interacciones de Keesom se forman como resultado de la polarización de moléculas o de grupos de átomos. En el agua, los electrones del oxígeno tienden a concentrarse en un lugar alejado del hidrógeno. La diferencia de carga que resulta permite que la molécula se una débilmente con otras moléculas de agua.

Al enlazamiento entre moléculas que tienen momento dipolar permanente, llamado fuerza de Keesom, se le llama con frecuencia **punto de hidrógeno**, cuando los átomos de hidrógeno forman una de las regiones polarizadas. Así, el puente de hidrógeno es en esencia una fuerza de Keesom y es una clase de fuerza de van der Waals. La fuerza de Keesom relativamente grande entre las moléculas de agua es la causa de que la tensión superficial (72 mJ/m^2 o dinas/cm a temperatura ambiente) y el punto de ebullición (100°C) sean mucho mayores que los de muchos líquidos orgánicos de peso molecular comparable (tensión superficial ~ 20 a 25 dinas/cm; puntos de ebullición hasta 80°C).

Obsérvese que los enlaces de van der Waals son **enlaces secundarios**, pero los átomos dentro de la molécula o del grupo de átomos están unidos por fuertes enlaces covalentes o iónicos. Al calentar el agua hasta su punto de ebullición, se rompen los enlaces de van der Waals y el agua se transforma en vapor, pero se necesitan temperaturas mucho mayores para romper los enlaces que unen los átomos de oxígeno e hidrógeno.

Aunque se llaman "secundarios" debido a las energías de enlace, los enlaces de van der Waals desempeñan un papel muy importante en muchas áreas de la ingeniería. Las fuerzas de van der Waals entre átomos y moléculas juegan un papel muy importante en la determinación de la tensión superficial y el punto de ebullición de los líquidos. En la ciencia e ingeniería de materiales, la tensión superficial de los líquidos y la energía superficial de los sólidos entran en juego en distintas situaciones. Por ejemplo, cuando se quiere procesar polvos de cerámicos o de metales para formar partes sólidas y densas, con frecuencia los polvos se deben dispersar en agua o en líquidos orgánicos. El que se pueda lograr una buena dispersión depende de la tensión superficial del líquido y la energía superficial del sólido. La tensión superficial de los líquidos también cobra importancia cuando se maneja el procesamiento de los metales y las aleaciones fundidas (vaciado) y del vidrio fundido.

Las consideraciones sobre tensión superficial también entran en juego al soldar los metales y las aleaciones. Se observa que la tensión superficial de los vidrios y los metales fundidos es mucho mayor (~ 1000 a 1500 mJ/m^2 o dinas/cm) que la del agua y la de los líquidos orgánicos. Esto *no* se debe al enlace de van der Waals. Los altos valores de tensión superficial y energía superficial de metales y vidrios se deben principalmente a la fuerza de los enlaces iónicos, metálicos o covalentes entre los átomos que los forman.

Los enlaces de van der Waals pueden cambiar profundamente las propiedades de ciertos materiales. Por ejemplo, el grafito y el diamante tienen propiedades mecánicas muy distintas. En muchos materiales plásticos, las moléculas contienen partes polares o grupos laterales (por ejemplo, las de algodón o celulosa, PVC, teflón). Las fuerzas de van der Waals entre las cadenas de esos polímeros (Fig. 2-22) proveen una fuente adicional de enlace.

Los polímeros en los cuales están presentes las fuerzas de van der Waals tienden a ser relativamente más rígidos y tienen temperaturas de transición vítrea (T_g) relativamente mayores. La **temperatura de transición vítrea** es aquella abajo de la cual los polímeros tienden a comportarse como materiales frágiles; es decir, tienen poca ductilidad. En consecuencia, los polímeros con enlace de van der Waals (además de los enlaces covalentes en las cadenas y grupos laterales) son relativamente frágiles a temperatura ambiente; por ejemplo el PVC. Para procesar estos materiales, se deben "plastificar" agregando otras moléculas polares más pequeñas que interactúen con las partes polares de la molécula larga (cadena) de polímero, para bajar la T_g y aumentar la flexibilidad.

Lo fascinante de las fuerzas de van der Waals es que comienzan con interacciones entre átomos y moléculas que, en último término, conducen a fuerzas considerables entre partículas finas de cualquier material. Estas fuerzas casi siempre son de atracción y desempeñan un papel clave en el procesamiento de pinturas, tintas magnéticas para medios de grabación, polvos y dispersiones. Para procesar muchos materiales cerámicos y metálicos, se usan polvos de metal y cerámicos (secos o en lodos) mediante rutas que tienen el nombre colectivo de **procesamiento de polvos** (técnica de procesamiento de metales que comprende la unión en el estado sólido de un polvo fino granulado, para obtener un producto totalmente denso). Para

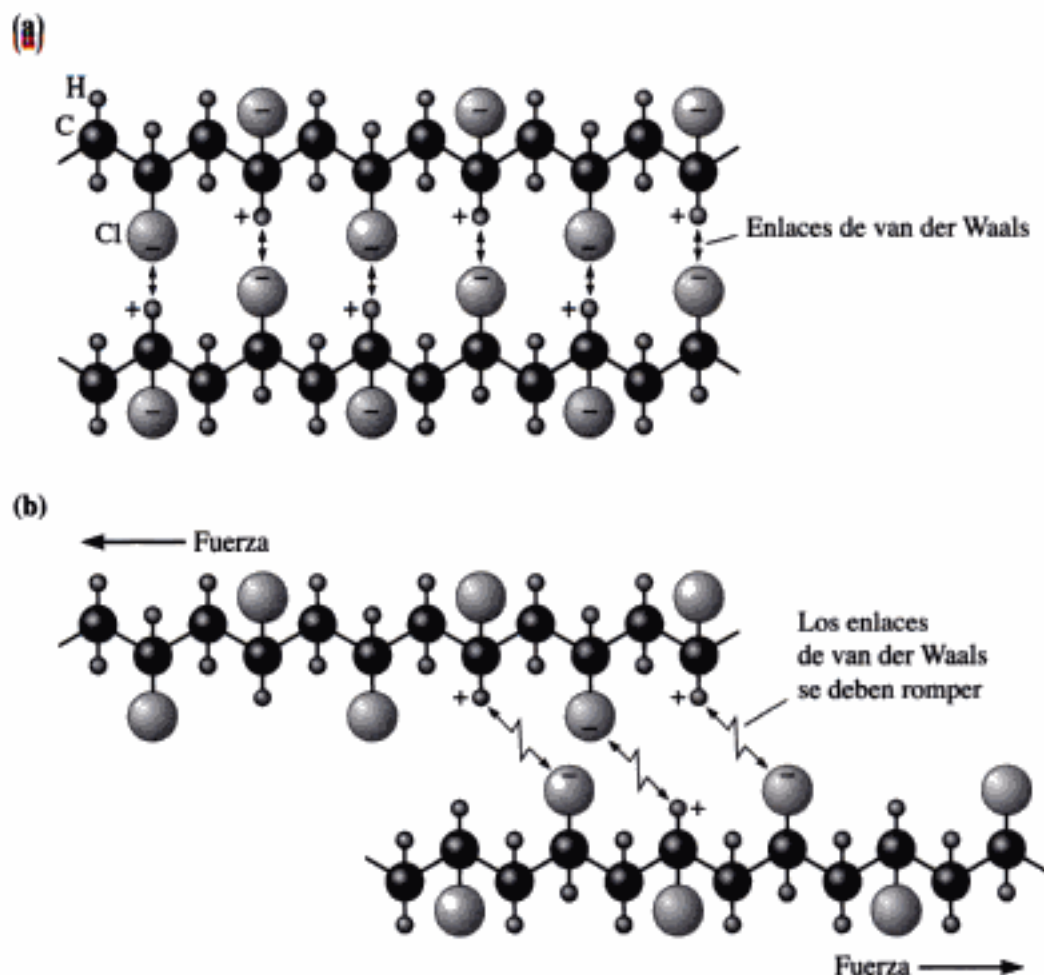


Figura 2-22 (a) En el cloruro de polivinilo (PVC), los átomos de cloro fijos a la cadena polimérica tienen una carga negativa; los de hidrógeno tienen carga positiva. Las cadenas están unidas débilmente por enlaces de van der Waals. Esta unión adicional hace que el PVC sea más rígido. (b) Cuando se aplica una fuerza al polímero, los enlaces de van der Waals se rompen y las cadenas se deslizan entre sí.

preparar suspensiones estables de polvos cerámicos o metálicos, deben sobrepasarse las fuerzas de van der Waals y otras de atracción entre las partículas. Esto puede hacerse introduciendo cargas eléctricas iguales en las partículas (estabilización electrostática) o adsorbiendo moléculas de un agente tensoactivo, semejantes a las de jabón, sobre las superficies de las partículas (estabilización estérica).

Enlace mixto En la mayoría de los materiales, el enlace entre los átomos es una mezcla de dos o más tipos. Por ejemplo, el hierro está enlazado en una combinación de enlazamiento metálico y covalente que evita que los átomos se empaquen o empaqueten en la forma eficiente que cabe esperar de ellos.

Los compuestos formados por dos o más metales (**compuestos intermetálicos**) se pueden unir con una mezcla de enlaces metálicos y iónicos, en especial cuando hay una gran diferencia de electronegatividades de los elementos. Como el litio tiene electronegatividad 1.0 y la del aluminio es 1.5, es de esperar que el AlLi tenga una combinación de enlace metálico y iónico. Por otro lado, dado que tanto el aluminio como el vanadio tienen electronegatividades de 1.5, cabe esperar que el Al_3V esté unido principalmente con enlaces metálicos.

Muchos compuestos cerámicos y semiconductores, que son combinaciones de elementos metálicos y no metálicos, tienen una mezcla de enlaces covalentes y iónicos. Al aumentar la diferencia de electronegatividades entre los átomos, el enlace es más iónico. La fracción de los enlaces que es covalente se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$\text{Fracción de covalentes} = \exp(-0.25\Delta E^2), \quad (2-1)$$

En el ejemplo 2-9 se investiga la naturaleza de los iones en la sílice.

EJEMPLO 2-9

Determine si la sílice está enlazada en forma iónica o covalente

En uno de los ejemplos anteriores, usamos la sílice (SiO_2) como ejemplo de materiales con enlace covalente. En realidad, la sílice tiene enlaces iónicos y covalentes. ¿Qué fracción de los enlaces es covalente? Describa ejemplos de aplicaciones en las que se use la sílice.

SOLUCIÓN

De acuerdo con la figura 2-10, se estima que la electronegatividad del silicio es 1.8, y la del oxígeno es 3.5. La fracción de los enlaces covalentes es:

$$\text{Fracción de covalencia} = \exp[-0.25(3.5 - 1.8)^2] = \exp(-0.72) = 0.486.$$

Aunque el enlazamiento covalente representa más o menos la mitad de todos los enlaces, la naturaleza direccional de ellos sigue desempeñando un papel importante en la estructura final de la SiO_2 .

La sílice tiene muchas aplicaciones; se usa en la fabricación de vidrios y fibras ópticas. Se agregan nanopartículas de sílice, a los neumáticos, para aumentar la rigidez del caucho. Los cristales de silicio (Si) de alta pureza se fabrican por reducción de la sílice a silicio.

EJEMPLO 2-10

Estrategias de diseño para fibras ópticas de sílice

La sílice se usa para fabricar tramos largos de fibras ópticas (Fig. 2-4). Siendo un material con enlaces covalentes y iónicos, es de esperar que las resistencias de sus enlaces sea alta. Otros factores, como la susceptibilidad de las superficies de sílice para reaccionar con el vapor de agua de la atmósfera, tienen un efecto adverso sobre su resistencia. Considerando lo anterior ¿qué estrategias de diseño se puede imaginar usted para que las fibras de sílice se puedan doblar en grado considerable sin romperse?

SOLUCIÓN

Con base en el enlace iónico y covalente de la sílice, se sabe que los enlaces Si-O son muy fuertes. También se sabe que los enlaces covalentes son direccionales y, en consecuencia, se puede anticipar que la sílice presenta ductilidad limitada. Por tanto, nuestras alternativas de aumentar la ductilidad de las fibras ópticas son bastante limitadas, porque la composición es esencialmente fija. La mayoría de los demás vidrios también son frágiles. Podemos pensar que las fibras de sílice tengan mejor ductilidad a mayores temperaturas. Sin embargo, hay que usarlas para fabricar tramos largos de fibras ópticas (la mayoría de las cuales se van a enterrar en el suelo o tender bajo el mar); en consecuencia, no es una opción práctica mantenerlas a temperaturas elevadas.

Por lo anterior, debemos comprender, aparte de lo que puede ofrecernos la consideración de la naturaleza del enlace, por qué las fibras de vidrio tienen ductilidad limitada. ¿Es una propiedad *intrínseca* del vidrio o hay *variables externas* que causan un cambio en la química y la estructura del vidrio? Los científicos y los ingenieros en materiales han reconocido que la falta de ductilidad en las fibras de vidrio óptico se relaciona con la capacidad de la superficie de la sílice para reaccionar con el vapor de agua de la atmósfera. Han encontrado que el vapor de agua de la atmósfera reacciona con la superficie de la sílice causando microgrietas en ella. Cuando se someten a esfuerzos esas grietas crecen con rapidez y las fibras se rompen con mucha facilidad! También han probado fibras de sílice en el vacío, y encontraron que los niveles a los cuales se pueden doblar las fibras son mucho mayores. ¿Y si se protege la superficie de las fibras de sílice, igual que cuando se pintan los automóviles y los puentes para evitar que se oxiden? Es lo que hacen los fabricantes de fibras ópticas, como Corning y Lucent. Cuando se fabrican las fibras ópticas, se recubren de inmediato con una película de polímero. Después se encapsulan haces de esas fibras en cables metálicos y se usan en las redes de fibras ópticas.

26

Energía de enlace y distancia interatómica

Distancia interatómica La distancia de equilibrio entre átomos se debe a un balance entre fuerzas de repulsión y de atracción. Por ejemplo, en el enlace metálico, la atracción entre los electrones y los iones del interior se equilibra con la repulsión entre los iones interiores. La separación de equilibrio se establece cuando la energía interatómica total del par de átomos es mínima o cuando no actúa una fuerza neta que atraiga o repele a los átomos (Fig. 2-23).

La **distancia interatómica**, espaciamiento interatómico o separación interatómica, en un material sólido es *aproximadamente* igual al diámetro atómico, es decir, dos veces el radio r de los átomos. Sin embargo, no se puede usar este criterio en materiales con enlace iónico, porque la distancia es la suma de los dos radios iónicos diferentes. Los radios atómicos y iónicos de los elementos aparecen en el apéndice B, y se usarán en el siguiente capítulo.

La energía mínima de la figura 2-23 es la **energía de enlace**; es la que se requiere para formar o romper el enlace. En consecuencia, los materiales que tienen una energía de enlace grande también tienen una resistencia y una temperatura de fusión altas. Los materiales con enlazamiento iónico tienen una energía de enlace especialmente grande (tabla 2-3) por la gran diferencia en electronegatividades de los iones. Los metales tienen menores energías de enlace, porque las electronegatividades de los átomos son semejantes.

TABLA 2-3 ■ Energías de enlace para los cuatro mecanismos de enlazamiento

Enlace	Energía de enlace (kcal/mol)
Iónico	150-370
Covalente	125-300
Metálico	25-200
Van der Waals	<10

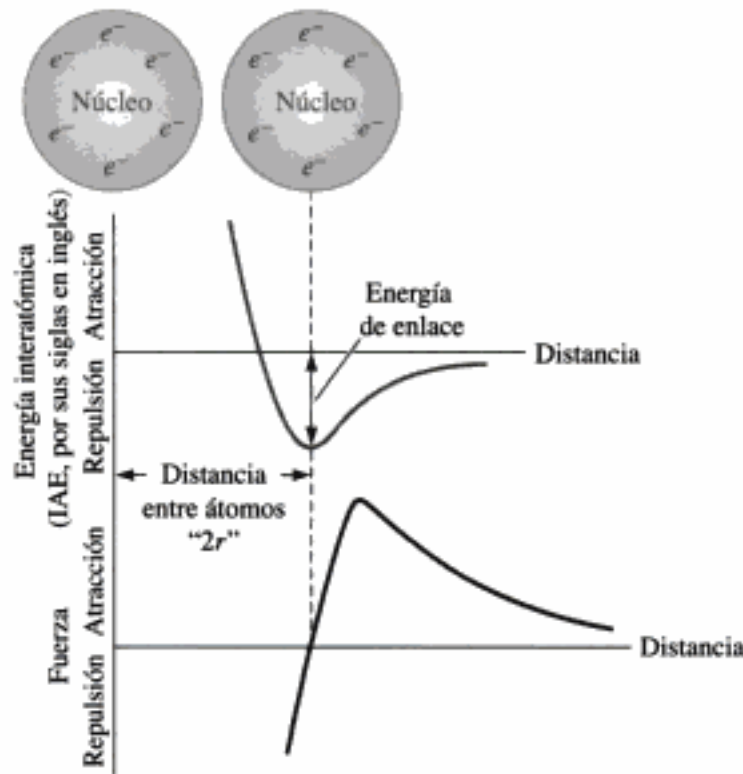


Figura 2-23 Los átomos o los iones están separados por una distancia de equilibrio que corresponde a la energía interatómica mínima de un par de átomos o iones (cuando la fuerza que atrae o repele a los átomos o los iones es cero).

Hay otras propiedades que se pueden considerar en las relaciones entre fuerza-distancia y energía-distancia de la figura 2-24. Por ejemplo, el **módulo de elasticidad** (E) de un material, que es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en la región elástica y también se le llama módulo de Young, se relaciona con la pendiente de la curva de la fuerza en función de la distancia (Fig. 2-24). Una pendiente grande, que se relaciona con una mayor energía de enlace y un mayor punto de fusión, equivale a una mayor fuerza necesaria para estirar el enlace; en consecuencia, el material tiene un módulo de elasticidad grande.

Un punto interesante que debe mencionarse es que no todas las propiedades de los materiales diseñados son sensibles a la microestructura. El módulo de elasticidad es una de esas propiedades. Si hay dos muestras de aluminio que tengan en esencia la misma composición química, pero con distinto tamaño de grano, cabe esperar que el módulo de elasticidad de ellas sea más o menos igual. Sin embargo, el **esfuerzo de cedencia** o punto de cedencia, que es el

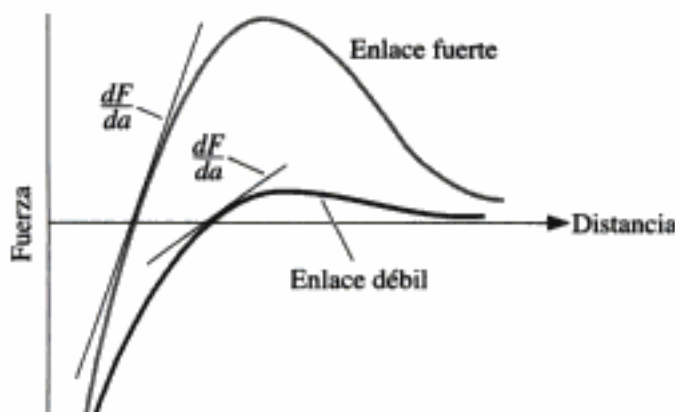


Figura 2-24 Curva fuerza-distancia para dos materiales, donde se observa la relación entre enlazamiento atómico y módulo de elasticidad. Una pendiente dF/da muy pronunciada determina un módulo grande.

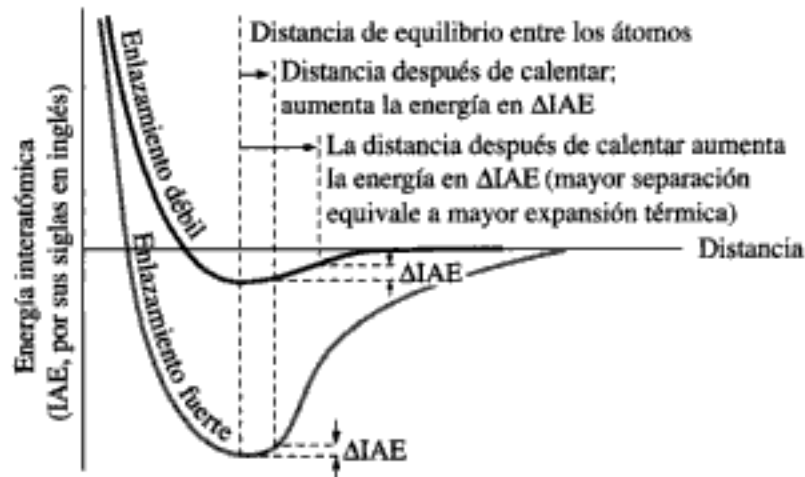


Figura 2-25 Curva de energía interatómica (IAE, por sus siglas en inglés) en función de la distancia entre dos átomos. Los materiales que tienen una curva pronunciada con un valle hondo tienen bajos coeficientes de dilatación térmica lineal.

valor del esfuerzo en el cual el material comienza a deformarse con facilidad al aumentar el esfuerzo, será muy distinta en esas muestras. En consecuencia, la resistencia de cedencia es una propiedad sensible a la microestructura. En capítulos posteriores veremos que, en comparación con otras propiedades mecánicas, como el punto de cedencia y resistencia a la tensión, el módulo de elasticidad no depende mucho de la microestructura. Ese módulo se puede relacionar en forma directa con la fuerza de los enlaces entre los átomos. Así, el módulo de elasticidad depende principalmente de los átomos que forman el material.

Otra propiedad que se puede vincular con la energía de enlace o las curvas fuerza/distancia interatómica es el **coeficiente de dilatación térmica** o coeficiente de expansión térmica. Se define como $\alpha = (1/L)(dL/dT)$, donde las dimensiones generales del material en una dirección dada son L , y aumentan al aumentar la temperatura T . El coeficiente de dilatación térmica describe cuánto se dilata o se contrae el material cuando cambia su temperatura. También se relaciona con la fuerza de los enlaces atómicos. Para que los átomos se muevan respecto a su separación de equilibrio, se debe agregar energía al material. Si un valle muy profundo en la energía interatómica causado por un enlace atómico fuerte es característico del material (Fig. 2-25), los átomos se separan en menor grado y tienen un coeficiente bajo de dilatación térmica lineal. Los materiales con bajo coeficiente de dilatación térmica mantienen sus dimensiones con menor variación cuando cambia la temperatura. Es importante observar que hay características microestructurales (como la anisotropía o variación de propiedades en función de la dirección cristalográfica, así como otros efectos en la dilatación térmica) que también tienen un efecto importante sobre el coeficiente general de dilatación térmica de un material diseñado. En realidad, los científicos e ingenieros en materiales han desarrollado materiales que tienen coeficientes de dilatación térmica muy pequeños, bajos o negativos (capítulo 21).[5]

Los materiales con muy pequeña dilatación son útiles en muchas aplicaciones donde se espera que los componentes sufran calentamiento y enfriamiento relativamente rápidos en forma repetitiva. Por ejemplo, los cerámicos de cordierita que se usan como soporte de catalizadores en convertidores catalíticos de automóvil, los vidrios de dilatación ultrabaja, Visionware™, y otros vitrocerámicos desarrollados por Corning, tienen coeficientes de dilatación térmica muy bajos. En el caso de películas delgadas o recubrimientos de sustratos no sólo se tienen en cuenta los valores reales de los coeficientes de dilatación térmica, sino también la diferencia entre esos coeficientes propios del sustrato y de la película o del recubrimiento. Si la diferencia entre ellos es demasiado grande, se provoca el desarrollo de esfuerzos que conducen al desprendimiento o al pliegue de la película o recubrimiento (capítulo 21).

EJEMPLO 2-11**Diseño de un brazo para transbordador espacial**

Los transbordadores espaciales de la NASA tienen un largo brazo robótico manipulador, que se llama sistema de manipulador remoto del transbordador (SRMS, *Shuttle Remote Manipulator System*) (Fig. 2-26) que permite a los astronautas lanzar o recuperar satélites. También se usa para ver y vigilar el exterior del transbordador, usando una cámara de video remota, montada en él. Seleccione un material adecuado para este dispositivo.



Figura 2-26 El sistema manipulador remoto del transbordador de la NASA (para el ejemplo 2-11). (Cortesía de Getty Images.)

SOLUCIÓN

Nos concentraremos en dos de las muchas opciones para los materiales. La primera es que el material debe ser rígido para que haya poca flexión al aplicarle una carga; esta propiedad ayuda a que el operador maniobre el brazo manipulador con precisión. En general, los materiales con enlaces fuertes y altos puntos de fusión también tienen un módulo de elasticidad o de rigidez alta. En segundo lugar, el material debe ser ligero, para permitir el manejo de grandes cargas en órbita. En consecuencia, se necesita baja densidad. ¡Se estima que cuesta unos US 100 000 poner en el espacio el peso de una lata de bebida! En consecuencia, la densidad debe ser la más baja posible.

Una buena rigidez se obtiene con metales de alto punto de fusión —como berilio y tungsteno— con cerámicos y con ciertas fibras —como las de carbono. Sin embargo, el tungsteno tiene una densidad muy alta, mientras que los cerámicos son muy frágiles. El berilio, que tiene un módulo de elasticidad mayor que el del acero y una

densidad menor que la del aluminio, podría ser un candidato excelente. Sin embargo, debe tenerse en cuenta la toxicidad del Be y sus compuestos. El material preferido es un compuesto formado por fibras de carbono embebidas en una matriz de resina epóxica. Las fibras de carbono tienen un módulo de elasticidad excepcionalmente grande, mientras que la combinación de carbono con resina epóxica proporciona un material con muy baja densidad. También deben tenerse en cuenta otros factores, como la exposición a temperaturas bajas y altas en el espacio y en la Tierra. El brazo robótico actual del transbordador tiene unos 15 metros de largo, 38 cm de diámetro y pesa unos 410 kg. En el espacio puede manipular pesos de hasta 260 toneladas.

RESUMEN

- Igual que la composición, la estructura de un material tiene una influencia profunda en sus propiedades.
- La estructura de los materiales se puede comprender en varios niveles: estructura atómica, arreglos atómicos de largo y corto alcances, nanoestructura, microestructura y macroestructura. Los ingenieros que se ocupan de las aplicaciones prácticas deben comprender la estructura a niveles tanto micro como macro. Como los átomos y los arreglos atómicos constituyen los bloques de construcción de los materiales avanzados, se necesita comprender la estructura a nivel atómico. Hay muchos dispositivos novedosos que están apareciendo, basados en sistemas microelectromecánicos y en la nanotecnología. En consecuencia, también es muy importante, para algunas aplicaciones, comprender la estructura de los materiales a una nanoescala.
- La estructura electrónica del átomo, que se describe con un conjunto de cuatro números cuánticos, ayuda a determinar la naturaleza del enlazamiento atómico y, en consecuencia, las propiedades físicas y mecánicas de los materiales.
- El enlace entre átomos se determina en parte por la forma en que interaccionan los electrones de valencia asociados a cada átomo. Las clases de enlaces comprenden el metálico, el covalente, el iónico y el de van der Waals. La mayoría de los materiales diseñados tienen enlace mixto, una mezcla de los anteriores.
- Un enlace metálico se forma como resultado de que los átomos de elementos con baja electronegatividad ceden sus electrones de valencia, lo que resulta en la formación de un "mar" de electrones. Los enlaces metálicos no son direccionales y son relativamente fuertes. En consecuencia, la mayoría de los metales puros tienen un módulo de elasticidad y una ductilidad altos; son buenos conductores de calor y electricidad y reflejan la luz visible.
- Un enlace covalente se forma entre dos átomos cuando cada uno cede el electrón que se necesita en la formación del enlace. Los enlaces covalentes se encuentran en muchos materiales poliméricos y cerámicos. Estos enlaces son fuertes; la mayoría de los materiales inorgánicos con enlaces covalentes tienen altos valores de resistencia, dureza y su ductilidad es limitada. La mayoría de los materiales plásticos con base en enlaces carbono-carbono (C-C) y carbono-hidrógeno (C-H) tienen resistencias relativamente menores y buenos valores de ductilidad. La mayoría de los materiales con enlaces covalentes tienden a ser aislantes eléctricos relativamente buenos. Algunos materiales, como el Si y el Ge son semiconductores.
- El enlace iónico que se encuentra en muchos cerámicos se produce cuando un átomo electropositivo "cede" o "dona" un electrón a un átomo electronegativo, creando cationes con carga positiva y aniones con carga negativa. Como en los materiales con enlaces covalentes, éstos tienden a ser mecánicamente fuertes y duros, pero frágiles. Los puntos de fusión de los materiales con enlaces iónicos son relativamente altos. Estos materiales suelen ser

aislantes eléctricos. Sin embargo, en algunos casos su microestructura se puede adaptar para obtener una conductividad iónica apreciable.

- Los enlaces de van der Waals se forman cuando los átomos o grupos de átomos tienen una carga eléctrica asimétrica y permiten que el enlace sea por atracción electrostática. La asimetría de la carga se debe a dipolos inducidos o permanentes. Las fuerzas de London son el resultado de interacciones entre los dipolos inducidos. Las interacciones entre dipolos permanentes se llaman interacciones de Keesom. Las interacciones entre dipolos permanentes y dipolos inducidos se llaman interacciones de Debye. Aunque su magnitud es relativamente pequeña, las fuerzas de van der Waals desempeñan un papel principal en la determinación de la tensión superficial y el punto de ebullición de los líquidos, en especial de los que son polares. Las fuerzas de van der Waals entre las partículas de materiales cerámicos y de otras clases representan un papel importante en los factores que afectan la estabilidad de lodos, pinturas, dispersiones, etc.; también tienen un papel importante en el comportamiento mecánico de los plásticos que contienen grupos polares (por ejemplo, el PVC).
- La energía de enlace se relaciona con la resistencia o fuerza de los enlaces, y es alta en especial en los materiales con enlaces iónicos y covalentes. Los materiales con energía de enlace grande tienen con frecuencia una temperatura de fusión alta, un módulo de elasticidad grande y un coeficiente de dilatación térmica pequeño.
- No todas las propiedades de los materiales son sensibles a la microestructura; el módulo de elasticidad es una de ellas.
- Al diseñar materiales para componentes, se debe prestar atención a la composición básica del material. También se debe comprender el enlazamiento en el material y tratar de adaptarlo para cumplir con determinados requisitos de funcionamiento. Por último, también debe tenerse en cuenta el costo de las materias primas, los costos de manufactura, el impacto ambiental y los factores que afectan la duración.

GLOSARIO

Anión Ion con carga negativa que se produce cuando un átomo, por lo general de un no-metal, acepta uno o más electrones.

Arreglos atómicos de corto alcance Ordenamientos atómicos a una distancia de pocos nm.

Arreglos atómicos de largo alcance Patrones tridimensionales repetitivos según los cuales se ordenan los átomos o iones en los materiales cristalinos.

Capa cuántica Conjunto fijo de niveles de energía al que pertenecen los electrones. Cada electrón en la capa se especifica con cuatro números cuánticos.

Catión Ion con carga positiva que se produce cuando un átomo, por lo general de metal, cede sus electrones de valencia.

Coeficiente de dilatación térmica Cantidad que varía las dimensiones de un material cuando cambia la temperatura. Un material con bajo coeficiente de dilatación térmica tiende a retener sus dimensiones cuando cambia la temperatura.

Composición Constitución química de un material.

Compuesto intermetálico Compuesto como el Al_3V formado por dos o más átomos metálicos; su enlazamiento suele ser una combinación de enlaces metálicos y iónicos.

Distancia interatómica Distancia de equilibrio entre los centros de dos átomos. En los elementos sólidos, la distancia interatómica es igual al diámetro aparente del átomo.

- Dopante** Elemento que se agrega en forma deliberada a un semiconductor (por ejemplo, P en el Si).
- Ductilidad** Capacidad de los materiales de ser estirados o doblados sin romperse.
- Electronegatividad** Tendencia relativa de un átomo para aceptar un electrón y transformarse en un anión. Los átomos fuertemente electronegativos aceptan electrones con facilidad.
- Elementos de transición** Conjunto de elementos cuyas configuraciones electrónicas son tales que comienzan a llenarse sus niveles *d* y *f* internos. Esos elementos suelen tener varias valencias, y son útiles en aplicaciones electrónicas, magnéticas y ópticas.
- Energía de enlace** Energía necesaria para separar dos átomos desde su distancia de equilibrio hasta una distancia infinita. También es la fuerza del enlace entre dos átomos.
- Enlace covalente** El que se forma entre los dos átomos cuando comparten sus electrones de valencia.
- Enlace de van der Waals** Enlace secundario formado entre átomos y moléculas, como consecuencia de interacciones entre dipolos que sean inducidos o permanentes.
- Enlace iónico** Enlace que se forma entre dos especies atómicas distintas cuando un átomo (el catión) dona sus electrones de valencia al segundo átomo (el anión). Los iones quedan unidos entre sí por una atracción electrostática.
- Enlace metálico** Atracción electrostática entre los electrones de valencia y los centros iónicos con carga positiva.
- Enlaces primarios** Enlaces fuertes entre átomos adyacentes; se deben a la transferencia o a compartir los electrones en orbitales externos.
- Enlace secundario** Enlace débil, como los de van der Waals, que suele unir moléculas entre sí.
- Escala de longitud** Distancia o intervalo relativo de distancias; se usan para describir la estructura, las propiedades o los fenómenos relacionados con el material.
- Estructura** Descripción de los arreglos espaciales de los átomos o los iones en un material.
- Estructura atómica** Todos los átomos y sus arreglos que constituyen los bloques de construcción de la materia.
- Fuerzas de London** Fuerzas de van der Waals entre moléculas que no tienen un momento dipolar permanente.
- Interacciones de Debye** Fuerzas de van der Waals que se producen entre dos moléculas cuando sólo una de ellas tiene un momento dipolar permanente.
- Interacciones de Keesom** Fuerzas de van der Waals entre moléculas que tienen un momento dipolar permanente.
- Macroestructura** Estructura de un material a nivel macroscópico. La escala de longitud es $\sim > 100$ nm. Las propiedades características comprenden porosidad, recubrimientos superficiales y microgrietas externas o internas.
- Masa atómica** Masa del número de Avogadro (6.02×10^{23}) de átomos, g/mol. Normalmente, es la cantidad promedio de protones y neutrones en el átomo. También se le llama peso atómico.
- Material amorfo** Material que no tiene orden de largo alcance en sus átomos; por ejemplo, el vidrio de sílice.
- Materiales cristalinos** Materiales en los cuales los átomos están ordenados en forma periódica y muestran un orden de largo alcance.

Microestructura Estructura de un material a una escala de longitud de ~ 10 a 1000 nm. Suele incluir características como tamaño promedio de grano, distribución de tamaños de grano, orientación de granos y las relacionadas con los defectos en los materiales.

Módulo de elasticidad (E) Pendiente de la curva esfuerzo-deformación unitaria en la región elástica. También se llama módulo de Young.

Moléculas polares Moléculas que han desarrollado un momento dipolar por virtud de un campo eléctrico interno o externo.

Nanoescala Escala de longitud de 1 a 100 nm.

Nanoestructura Estructura de un material en la nanoescala ($\sim$ escala de longitud de 1 a 100 nm).

Nanotecnología Conjunto emergente de tecnologías basadas en dispositivos, fenómenos y materiales en nanoescala.

Número atómico Cantidad de protones o de electrones en un átomo.

Número de Avogadro Cantidad de átomos o moléculas en un mol. El número de Avogadro es 6.02×10^{23} por mol.

Número cuántico azimutal Número cuántico que representa distintos niveles de energía en las capas principales.

Número cuántico de giro o espín Número cuántico que indica el giro de un electrón.

Número cuántico magnético Número cuántico que describe niveles de energía para cada número cuántico azimutal.

Números cuánticos Números que asignan niveles discretos de energía a los electrones de un átomo. Los cuatro números cuánticos son el principal n , el azimutal l , el magnético m_l y el de giro m_s .

Principio de exclusión de Pauli No más de dos electrones en un átomo pueden tener la misma energía. Los dos electrones tienen espines magnéticos opuestos.

Procesamiento de polvos Técnica de procesamiento de metales que comprende la unión de polvos finos, en estado sólido, para formar un producto policristalino.

Puente de hidrógeno También enlace de hidrógeno. Una interacción de Keesom (una clase de enlace de van der Waals) entre moléculas, donde interviene un átomo de hidrógeno. Por ejemplo, enlaces *entre* moléculas de agua.

Relación direccional Los enlaces entre átomos en materiales con enlaces covalentes forman ángulos específicos entre sí, que dependen del material.

Resistencia a la cedencia También punto de cedencia o esfuerzo de cedencia. Valor de la resistencia por arriba del cual un material comienza a mostrar deformación permanente (o plástica).

Semiconductor II-VI Semiconductor basado en elementos de los grupos 2B y 6B de la tabla periódica (por ejemplo, CdSe).

Sistemas microelectromecánicos (MEMS por sus siglas en inglés) Consisten en dispositivos en miniatura que se preparan normalmente por micromaquinado.

Semiconductor III-V Semiconductor basado en elementos de los grupos 3A y 5B de la tabla periódica (por ejemplo, GaAs).

Temperatura de transición vítrea Temperatura por arriba de la cual muchos polímeros y vidrios inorgánicos ya no se comportan como materiales frágiles. Aumenta mucho su ductilidad arriba de la temperatura de transición vítrea.

Termistor Dispositivo para medir la temperatura, aprovechando el cambio de conductividad eléctrica cuando cambia la temperatura.

Unidad de masa atómica (uma) Masa de un átomo expresada en doceavas partes (1/12) de la masa de un átomo de carbono.

Valencia Cantidad de electrones en un átomo que participan en las reacciones químicas o de enlace. La valencia suele ser la cantidad de electrones en los niveles externos *s* y *p* de energía.

INFORMACIÓN ADICIONAL

1. "Special Issue: Nanotech. The Science of the Small Gets Down to Business", *Scientific American*, septiembre de 2001.
2. BISHOP, D., P.G. GAMMEL y C. RANDY. "Micromachines on the Rise", *Physics Today*, octubre de 2001, pp. 38-44.
3. KULKARNI, V.G. "Polyanilines: Progress in Processing and Applications", *ACS Symp. Series*, American Chemical Society, 1999.
4. HERBERT, J.M. y A.J. MOULSON. *Electroceramics. Materials, Properties and Applications*, 1990.
5. ROY, R., D.K. AGRAWAL, J. ALAMA y R.A. ROY. "A New Structural Family of Near Zero Expansion Ceramics", *Materials Research Bulletin*, vol. 19, 1984, pp. 471-477.

✓ PROBLEMAS

Sección 2-1 La estructura de los materiales: importancia tecnológica

- 2-1 ¿Qué significa el término *composición* de un material?
- 2-2 ¿Qué significa el término *estructura* de un material?
- 2-3 ¿Cuáles son los diferentes niveles de estructura de un material?
- 2-4 ¿Por qué es importante tener en cuenta la estructura de un material cuando se diseñan y se fabrican componentes?
- 2-5 ¿Cuál es la diferencia entre la microestructura y la macroestructura de un material?

Sección 2-2 La estructura del átomo

- 2-6 a) El papel de aluminio que se usa para almacenar alimentos pesa unos 0.3 g por pulgada cuadrada. ¿Cuántos átomos de aluminio contiene una pulgada cuadrada de ese papel?
b) Con las densidades y los pesos atómicos que se encuentran en el apéndice A, calcule y compare la cantidad de átomos por centímetro cúbico en i) el plomo y ii) el litio.
- 2-7 a) Con los datos del apéndice A, calcule la cantidad de átomos de hierro en una tonelada corta (2000 libras) de hierro.
b) Use los datos del apéndice A para calcular el volumen, en centímetros cúbicos, que ocupa un mol de boro.
- 2-8 Para niquelar una parte de acero con 200 in² de superficie, con una capa de 0.002 in de espesor de níquel: a) ¿cuántos átomos de níquel se requieren? b) ¿Cuántos moles de níquel se requieren?

Sección 2-3 La estructura electrónica del átomo

- 2-9 Suponiendo que un elemento tiene valencia 2 y número atómico 27, y sólo con base en los números cuánticos, ¿cuántos electrones debe haber en el nivel de energía 3d?
- 2-10 El indio, con número atómico 49, no contiene electrones en sus niveles de energía 4f. Sólo con esta información, ¿cuál debe ser la valencia del indio?
- 2-11 Sin ver el apéndice C, describa los números cuánticos de cada uno de los 18 electrones en la capa M del cobre, con un formato semejante al de la figura 2-9.
- 2-12 En los metales, la carga eléctrica se transfiere con el movimiento de los electrones de valencia. ¿Cuántos portadores potenciales de carga hay en un alambre de aluminio de 1 mm de diámetro y 100 m de longitud?

$3s^1$	electrón 11	$n = 3, l = 0, m_l = 0, m_s = +\frac{1}{2} \text{ o } -\frac{1}{2}$
$2p^6$	electrón 10	$n = 2, l = 1, m_l = +1, m_s = -\frac{1}{2}$
	electrón 9	$n = 2, l = 1, m_l = +1, m_s = +\frac{1}{2}$
	electrón 8	$n = 2, l = 1, m_l = 0, m_s = -\frac{1}{2}$
	electrón 7	$n = 2, l = 1, m_l = 0, m_s = +\frac{1}{2}$
$2s^2$	electrón 6	$n = 2, l = 1, m_l = -1, m_s = -\frac{1}{2}$
	electrón 5	$n = 2, l = 1, m_l = -1, m_s = +\frac{1}{2}$
	electrón 4	$n = 2, l = 0, m_l = 0, m_s = -\frac{1}{2}$
	electrón 3	$n = 2, l = 0, m_l = 0, m_s = +\frac{1}{2}$
$1s^2$	electrón 2	$n = 1, l = 0, m_l = 0, m_s = -\frac{1}{2}$
	electrón 1	$n = 1, l = 0, m_l = 0, m_s = +\frac{1}{2}$

Figura 2-9 (repetición del problema 2-11). El conjunto completo de números cuánticos de cada uno de los 11 electrones del sodio.

Sección 2-4 La tabla periódica

- 2-13 La tabla periódica de los elementos nos puede ayudar a racionalizar mejor las tendencias en las propiedades de los elementos y los compuestos, a partir de elementos de distintos grupos. Busque en la literatura publicada los coeficientes de expansión o dilatación térmica de los elementos del grupo 4B. Determine una tendencia y vea si se correlacionan con las temperaturas de fusión u otras propiedades —por ejemplo, espacio entre bandas— de estos elementos.
- 2-14 El enlace del compuesto intermetálico Ni_3Al es principalmente metálico. Explique por qué hay poco componente iónico, si es que lo hay, en el enlace. La electronegatividad aproximada del níquel es 1.8.
- 2-15 Haga una gráfica de las temperaturas de fusión de los elementos de las columnas desde la 4A hasta la 8 o 10 en la tabla periódica, en función del número atómico. Es decir, grafique las temperaturas de fusión del Ti hasta el Ni, del Zr hasta el Pd y del Hf hasta el Pt. Describa estas relaciones con base en el tipo de enlace atómico y en las energías de enlace: a) al aumentar el número atómico en cada fila de la tabla periódica y b) al aumentar el número atómico en cada columna de la tabla periódica.
- 2-16 Haga una gráfica de la temperatura de fusión de los elementos de la columna 1A en la tabla periódica, en función del número atómico. Es decir, grafique las temperaturas de fusión del Li hasta el Cs. Describa la relación, con base en el enlace atómico y la energía de enlace.

Sección 2-5 Enlazamiento atómico

- 2-17 Al aumentar la temperatura de un semiconductor se rompen los enlaces covalentes. Por cada enlace roto se liberan dos electrones, que se mueven y transfieren

carga eléctrica. a) ¿Qué fracción del total de los electrones de valencia tiene libertad de movimiento? b) ¿Qué fracción de enlaces covalentes se debe romper para que 5×10^{15} electrones conduzcan carga eléctrica en 50 g de silicio? c) ¿Qué fracción del total de átomos de silicio debe sustituirse con átomos de arsénico para que haya un millón de electrones que se muevan con libertad en una libra de silicio?

- 2-18 El metano (CH_4) tiene una estructura tetraédrica parecida a la de la SiO_2 , con un átomo de carbono de radio $0.77 \times 10^{-8} \text{ cm}$ en el centro y átomos de hidrógeno de $0.46 \times 10^{-8} \text{ cm}$ en cuatro de los ocho vértices. Calcule el tamaño del cubo tetraédrico del metano.
- 2-19 El fosfuro de aluminio (AlP, *aluminum phosphide*) es un semiconductor compuesto que tiene enlaces iónicos y covalentes mezclados. Calcule la fracción de enlace que es iónica.
- 2-20 Calcule la fracción de los enlaces del MgO que es iónica.
- 2-21 ¿Cuál es el tipo de enlace en el diamante? ¿Concuerdan las propiedades del diamante con la naturaleza de sus enlaces?
- 2-22 ¿Cuáles son algunas de las aplicaciones industriales del diamante?
- 2-23 Los materiales como el carburo de silicio (SiC) y el nitrato de silicio (Si_3N_4) se usan en aplicaciones de esmerilado y pulimentado; explique por qué se escogen estos materiales para estas aplicaciones.
- 2-24 ¿Qué clase de fuerzas de van der Waals actúan entre los átomos de argón?
- 2-25 ¿Qué clase de fuerzas de van der Waals actúan entre las moléculas de agua?
- 2-26 Explique por qué la tensión superficial del agua es mayor que las de líquidos orgánicos no polares.

- 2-27 Explique el papel de las fuerzas de van der Waals en el plástico de PVC.
- 2-28 ¿Por qué son importantes las fuerzas de van der Waals en la preparación de lodos cerámicos y otras dispersiones?

Sección 2-6 Energía de enlace y distancia interatómica

- 2-29 El berilio y el magnesio, ambos de la columna 2A de la tabla periódica, son metales ligeros. ¿Cuál esperaría usted que tenga mayor módulo de elasticidad? Explíquelo con base en la energía de enlace y los radios atómicos, con los esquemas correspondientes de fuerza en función de la distancia interatómica.
- 2-30 El boro tiene un coeficiente de dilatación térmica mucho menor que el aluminio, aun cuando ambos están en la columna 3B de la tabla periódica. Explique por qué es de esperarse esta diferencia, con base en la energía de enlace, tamaño de átomos y el pozo de energía.
- 2-31 ¿Qué espera usted que tenga mayor módulo de elasticidad: el MgO o el magnesio? Explique por qué.
- 2-32 ¿Qué espera usted que tenga mayor módulo de elasticidad: el Al_2O_3 o el aluminio? Explique por qué.
- 2-33 El aluminio y el silicio son vecinos en la tabla periódica. ¿Cuál de ellos espera usted que tenga mayor módulo de elasticidad (E)? Explique por qué.
- 2-34 Explique por qué es de esperarse que el módulo de elasticidad de los polímeros termoplásticos sencillos—como el polietileno y el poliestireno— sea muy pequeño en comparación con los de los metales y los cerámicos.
- 2-35 Para tratar de proteger el acero, se reviste con una capa delgada de un material cerámico contra la corrosión. ¿Qué cree usted que le sucederá al recubrimiento cuando la temperatura del acero aumente en forma apreciable? Explique por qué.
- 2-36 ¿Por qué se considera que el módulo de elasticidad es una propiedad insensible a la estructura?



Problemas de diseño

- 2-37 Para producir un material compuesto que se pueda sujetar a grandes fuerzas y grandes cambios de temperatura, usted desea introducir fibras de cerámica en una matriz de metal. ¿Qué parámetros de diseño tendría en cuenta para asegurar que las fibras permanezcan intactas y proporcionen resistencia a la matriz? ¿Qué problemas podrían presentarse?
- 2-38 Los álabes (o aspas o paletas) de las turbinas que se usan en los motores cohete se pueden fabricar con materiales como superaleaciones a base de níquel. En principio, hasta se pueden usar materiales cerámicos como la circonia u otras aleaciones a base de acero. En algunos casos, los álabes también se pueden recubrir con una barrera térmica como recubrimiento, para minimizar la exposición del material interior a altas temperaturas. ¿Qué parámetros de diseño tendría en cuenta para seleccionar un material para las álabes de esas turbinas, y para su recubrimiento, que funcione bien en ellas? Tenga en cuenta que las distintas partes del motor están expuestas a diferentes temperaturas, y que no todos los álabes están expuestos a temperaturas relativamente altas. ¿Qué problemas podrían presentarse? Tenga en cuenta factores como la temperatura y la humedad en el ambiente en el que deben funcionar los álabes de la turbina.
- 2-39 Un semiconductor extrínseco tipo n se puede producir introduciendo dopantes en silicio puro. Al hacerlo, hay electrones adicionales—además de los necesarios para participar en el mecanismo de enlace—que pasan a formar parte de la estructura y se pueden mover. Diseñe un sistema de aleación que cause esta semiconductividad extrínseca en el silicio.

Capítulo



Muchos materiales muestran un arreglo periódico de átomos o iones. Esta fotografía es de un sensor de oxígeno hecho de zirconia (ZrO_2). Este material exhibe distintas estructuras cristalinas. Es capaz de conducir la electricidad por el movimiento de los iones en la estructura cristalina. También se usa para fabricar celdas de combustible. En este capítulo, examinaremos las estructuras cristalinas de diversos materiales diseñados. (Imagen cortesía de Bosch © Robert Bosch GmbH.)

Arreglos atómicos y iónicos

¿Alguna vez se preguntó...

- ...qué es el silicio amorfo y en qué difiere del silicio con que se hacen los chips de computadora?
- ...cómo funcionan los sensores de oxígeno en los automóviles?
- ...qué son los cristales líquidos?
- ...si usted fuera a empacar una caja cúbica con esferas de tamaño uniforme, cuál es el empaquetamiento máximo posible?
- ...cómo se puede calcular la densidad de diversos materiales?

Los arreglos de átomos y de iones desempeñan un papel importante en la determinación de la microestructura y las propiedades de un material. Los principales objetivos de este capítulo son:

- a) explicar la clasificación de los materiales con base en los arreglos atómicos o iónicos y
- b) describir los arreglos en los sólidos cristalinos de acuerdo con las **estructuras de red, base y cristalina**.

Para los sólidos cristalinos, ilustraremos los conceptos de redes de Bravais, celdas unitarias y direcciones y planos cristalográficos, examinando los arreglos de los átomos o los iones en muchos materiales con importancia

tecnológica. Entre ellos están los metales (como Cu, Al, Fe, W, Mg, etc.), semiconductores (como Si, Ge, GaAs, etc.), cerámicos avanzados (como ZrO_2 , Al_2O_3 , $BaTiO_3$, etc.), superconductores cerámicos, diamante y otros materiales. Desarrollaremos la nomenclatura necesaria para caracterizar los arreglos atómicos o iónicos en los materiales cristalinos. Examinaremos el uso de la **difracción de rayos X**, la **microscopía electrónica de transmisión** y la **difracción de electrones**. Estas técnicas nos permiten explorar los arreglos de los átomos o de los iones en distintos materiales. Presentaremos una perspectiva de los distintos tipos de **materiales amorfos**, como el silicio amorfo, los vidrios metálicos, polímeros y los vidrios inorgánicos.

En el capítulo 2 se subrayó la manera en que el enlazamiento interatómico influye sobre ciertas propiedades de los materiales. En este capítulo destacaremos la influencia de los arreglos

atómicos y iónicos sobre las propiedades de los materiales diseñados. En particular, nos concentraremos en lo que son los arreglos "perfectos" de los átomos o los iones.

Los conceptos descritos en este capítulo nos prepararán para comprender la forma en que las *desviaciones* respecto a esos arreglos perfectos en los materiales cristalinos originan lo que se describe como **defectos a nivel atómico**. El término **defecto**, en este contexto, indica una falta de perfección en el orden atómico o iónico del material cristalino, y no indica imperfección o mala calidad en un material diseñado. En el capítulo 4 describiremos la forma en que estos defectos a nivel atómico permiten el desarrollo de aceros moldeables, y aún así resistentes, que se usan en automóviles y edificios, de las aleaciones de aluminio para aviones, las celdas solares y los módulos fotovoltaicos para satélites, de semiconductores y muchas otras tecnologías.

3-1

Orden de corto alcance versus orden de largo alcance

En los distintos estados de la materia se pueden encontrar cuatro clases de arreglos atómicos o iónicos (Fig. 3-1).

Sin orden En los gases monoatómicos como el argón (Ar) o el plasma que se forma en un tubo de luz fluorescente, los átomos o los iones no tienen arreglo ordenado. Estos materiales llenan todo el espacio disponible que tienen.

Orden de corto alcance (SRO) Un material tiene **orden de corto alcance (SRO, short-range order)** si el arreglo especial de los átomos sólo se extiende a su vecindad inmediata. Cada molécula de agua en el vapor tiene un orden de corto alcance debido a los enlaces covalentes entre los átomos de hidrógeno y los de oxígeno; esto es, cada átomo de oxígeno está unido a dos átomos de hidrógeno formando 104.5° entre los enlaces. Sin embargo, las moléculas de agua en el vapor no tienen un arreglo especial con respecto a sus posiciones mutuas.

Una situación parecida se observa en los materiales llamados vidrios inorgánicos. En el capítulo 2 describimos la **estructura tetraédrica** de la sílice, que satisface el requisito de que cuatro iones de oxígeno estén unidos a cada ion de silicio (Fig. 3-2). Sin embargo, como se describirá después, en un vidrio, las unidades tetraédricas se unen entre sí en una forma aleatoria. Esos tetraedros pueden compartir vértices, aristas o caras. Así, más allá de la unidad básica de un tetraedro de $(SiO_4)^{4-}$, no hay periodicidad en los arreglos de los átomos. En contraste, en el cuarzo o en otras formas de sílice cristalina, los tetraedros de $(SiO_4)^{4-}$ sí se conectan y forman distintos arreglos periódicos.

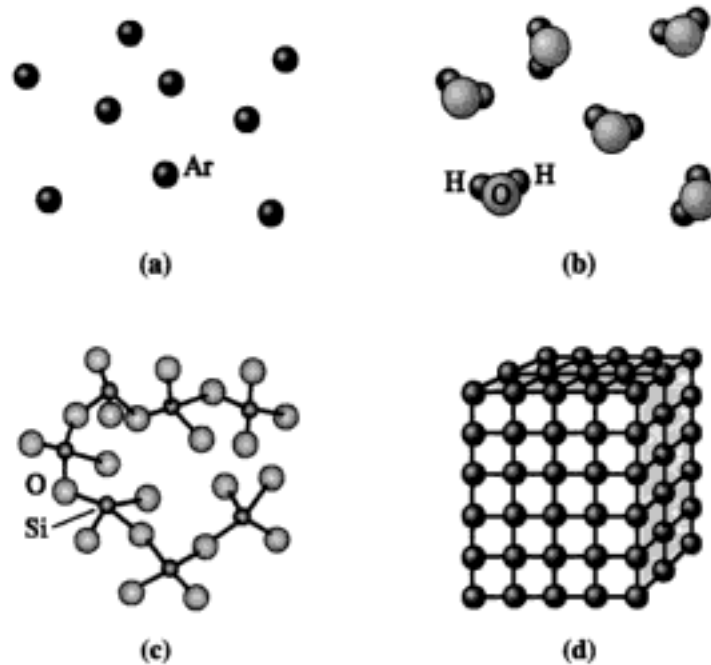


Figura 3-1 Niveles de ordenamiento atómico en los materiales: (a) los gases monoatómicos inertes no tienen ordenamiento regular de átomos. (b) y (c) Algunos materiales, que incluyen vapor de agua, nitrógeno gaseoso, silicio amorfo y vidrios de silicato, tienen orden de corto alcance. (d) Los metales, aleaciones y muchas cerámicas, así como algunos polímeros, tienen ordenamiento regular de átomos o iones que se extiende a través del material.

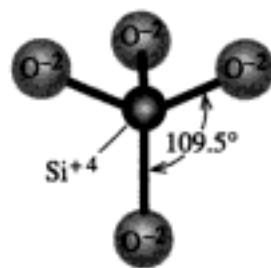


Figura 3-2 Tetraedro básico de Si-O en el vidrio de silicato.

Muchos polímeros muestran también arreglos atómicos de corto alcance que se parecen mucho a la estructura del vidrio de silicato. El polietileno está formado por cadenas de átomos de carbono con dos átomos de hidrógeno fijos a cada uno de los carbonos. Como el carbono tiene valencia cuatro y los átomos de carbono e hidrógeno están unidos con enlaces covalentes, de nuevo se produce una estructura tetraédrica (Fig. 3-3). Las unidades tetraédricas se pueden unir en forma aleatoria para producir las cadenas del polímero.

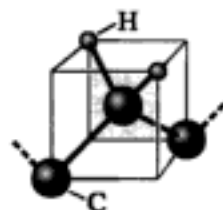
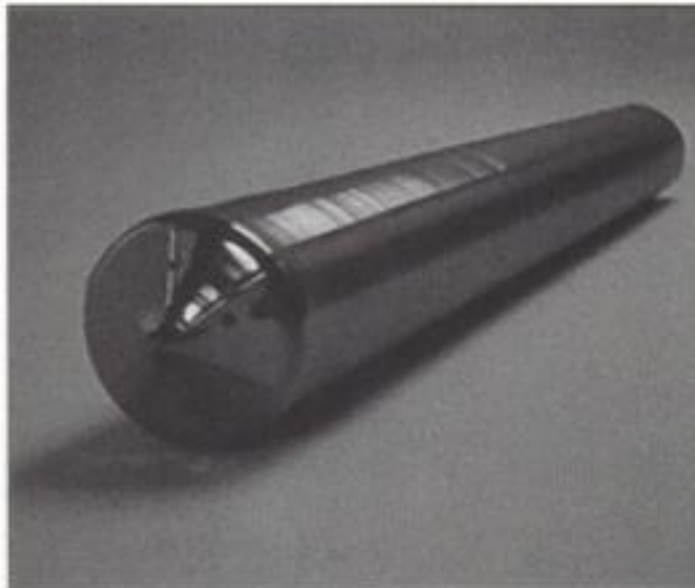
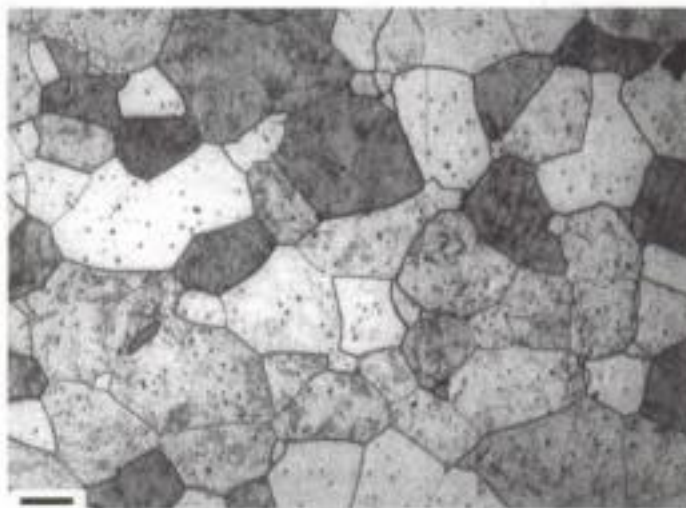


Figura 3-3 Arreglo tetraédrico de los enlaces C-H en el polietileno.



(a)



(b)

Figura 3-4

(a) Fotografía de un monocristal de silicio.
 (b) Micrografía de un acero inoxidable policristalino, donde se ven los granos y los límites de grano. (Cortesía de los Dres. M. Hua, I. García y A.J. Deardo.)

Orden de largo alcance (LRO) La mayoría de los metales y aleaciones, los semiconductores, los cerámicos y algunos polímeros tienen una estructura cristalina donde los átomos o iones muestran **orden de largo alcance (LRO, long-range order)**; el arreglo atómico especial abarca escalas de longitud mucho mayores de $\sim > 100$ nm. Los átomos o los iones en esos materiales forman un patrón regular y repetitivo, semejante a una red en tres dimensiones. A esos materiales se les llama **materiales cristalinos**. Si un material cristalino está formado por un solo cristal grande, se le llama **material monocristalino o monocristal**. Los monocristales se usan en muchas aplicaciones electrónicas y ópticas. Por ejemplo, los *chips* de computadora se fabrican con monocristales grandes de Si (hasta de 30 cm de diámetro) [Fig. 3-4(a)]. De igual manera, muchos de los dispositivos electroópticos útiles se fabrican a partir de cristales de niobato de litio, LiNbO_3 . También se pueden procesar los monocristales en forma de películas delgadas, que se usan en muchas aplicaciones electrónicas y de otra índole. Ciertos tipos de álabes de turbina también se fabrican con monocristales de superaleaciones a base de níquel. Un **material**



Figura 3-5

Pantalla de cristal líquido. Estos materiales son amorfos en un estado y sufren cristalización localizada como respuesta a un campo eléctrico externo; se usan mucho en las pantallas de cristal líquido (LCD). (Cortesía de Nick Koudis/PhotoDisc/Getty Images.)

policristalino está formado por muchos cristales pequeños con diversas orientaciones en el espacio. Estos cristales más pequeños se llaman **granos**. Un material policristalino se parece a un *collage* de varios monocristales diminutos. Los bordes entre los cristales diminutos, donde los cristales están desalineados entre sí, se llaman **límites de grano**. La figura 3-4(b) muestra la microestructura de un material de acero inoxidable policristalino. Muchos materiales cristalinos que se manejan en aplicaciones técnicas son policristalinos (como los aceros que se usan en la construcción, las aleaciones de aluminio para aviones, etc.). En capítulos posteriores aprenderemos que muchas de las propiedades de los materiales policristalinos dependen de las características físicas y químicas de los granos y también de los límites de grano. Las propiedades de los materiales monocristalinos dependen de su composición química y de las direcciones específicas dentro del cristal (llamadas direcciones cristalográficas). El orden de largo alcance en los materiales cristalinos se puede detectar y medir con técnicas como la **difracción de rayos X** o la **difracción de electrones** (sección 3-9).

Cristales líquidos Los cristales líquidos son materiales poliméricos que tienen un orden especial. En cierto estado los polímeros de cristal líquido se comportan como materiales amorfos (semejantes a líquidos). Sin embargo, cuando se les aplica un estímulo externo (como un campo eléctrico o un cambio de temperatura) algunas moléculas de polímero se alinean y forman pequeñas regiones que son cristalinas; de ahí el nombre de "cristales líquidos". Estos materiales tienen muchas aplicaciones en la tecnología de pantallas de cristal líquido (LCD, por sus siglas en inglés) (Fig. 3-5).[1]

En 2001, el Premio Nobel de Física fue para Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle y Carl E. Wieman, científicos que verificaron un nuevo estado de la materia, llamado **condensado de Bose-Einstein**. Ya en 1924, el Dr. Satyendranath Bose y Albert Einstein predijeron la existencia de este estado de la materia (Fig. 3-6).[2,3] En ese estado tan extraño, un grupo de átomos enfriados a temperaturas muy bajas (justo arriba de 0 Kelvin), mediante láseres y trampas magnéticas, tiene el mismo estado cuántico fundamental. Aunque los condensados de Bose-Einstein no tienen aplicaciones técnicas en la actualidad, serían útiles en estudios relacionados con el desarrollo de nanodispositivos, como láseres atómicos. La figura 3-7 muestra un resumen de la clasificación de los materiales con base en el tipo de orden atómico.

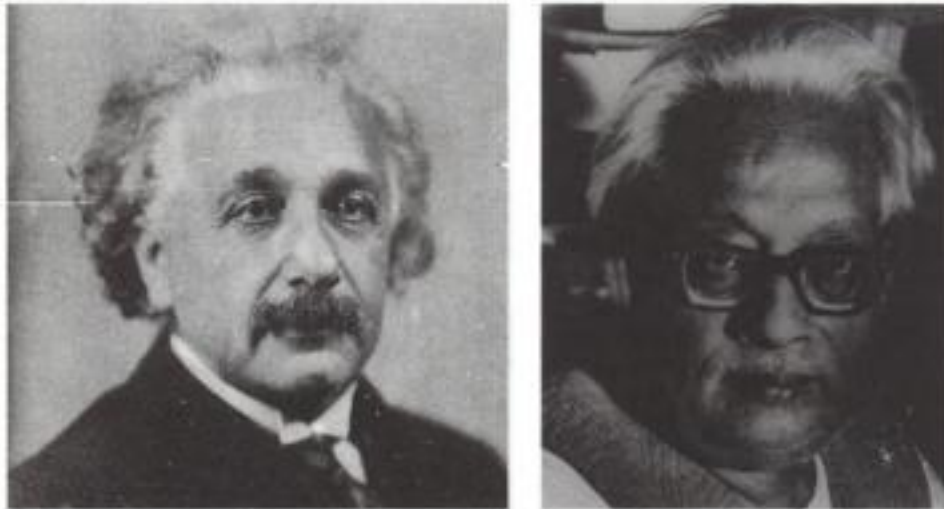


Figura 3-6 Albert Einstein y Satyendranath Bose predijeron la existencia del condensado de Bose-Einstein en 1924. (Foto de Einstein cortesía de la Biblioteca de la Universidad de Pennsylvania; foto de Bose cortesía del Indian National Council of Science Museums, Emilio Segre Visual Archives.)



Figura 3-7 Clasificación de los materiales con base en la clase de orden atómico.

3-2

Materiales amorfos: principios y aplicaciones tecnológicas

Todo material que sólo muestra ordenamiento de átomos o iones de corto alcance es un **material amorfo**, es decir, un material no cristalino. En general, la mayoría de los materiales tienden a formar arreglos periódicos, porque esta configuración maximiza su estabilidad termodinámica. Los materiales amorfos tienden a formarse cuando, por una u otra razón, la cinética del proceso de obtención de los mismos no permitió la formación de arreglos periódicos.

Los **vidrios**, que normalmente se forman en sistemas cerámicos y poliméricos, son buenos ejemplos de los materiales amorfos. De igual modo, algunas clases de geles poliméricos o coloidales, o materiales parecidos a los geles, también se consideran amorfos. Los materiales amorfos ofrecen, con frecuencia, una mezcla única e inusual de propiedades, porque los átomos o los iones no están acomodados en sus arreglos "regulares" y periódicos. Obsérvese que con frecuencia hay muchos materiales de ingeniería calificados como "amorfos" que pueden contener una fracción cristalina. Las técnicas como difracción de electrones y difracción de rayos X (sección 3-9) no se pueden usar para caracterizar el orden de corto alcance en los materiales amorfos. Los científicos usan la dispersión de neutrones y otros métodos para investigar el orden de corto alcance en los materiales amorfos.

Un ejemplo común de un material amorfo es un vidrio de silicato. Con el llamado **proceso de vidrio flotado**, se funden varios ingredientes, como sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), óxido de sodio (Na_2O)¹, óxido de calcio (CaO), etc., para formar los vidrios que se usan en los parabrisas de automóviles o los vidrios de ventanas. En este proceso, se agregan otros óxidos a la sílice para bajar la temperatura de fusión, porque aun a temperaturas de $\sim 1400^\circ\text{C}$, la sílice pura fundida es demasiado viscosa para que el proceso funcione. El vidrio fundido flota sobre un baño de estaño fundido; de ahí el nombre de vidrio flotado. Al solidificarse, los tetraedros de $(\text{SiO}_4)^{4-}$ (Fig. 3-2), que hay aun en el vidrio fundido, no tienen oportunidad de formar un arreglo periódico regular. Si en forma deliberada se eleva la temperatura de un vidrio de silicato y se mantiene alta (por ejemplo a 1000°C) durante largo tiempo, pequeñas porciones de este vidrio, que originalmente era amorfo, comienzan a "cristalizar", y los tetraedros de $(\text{SiO}_4)^{4-}$ comienzan a organizarse y a formar cristales diminutos. A medida que los cristales diminutos crecen, comienzan a dispersar la luz y el vidrio comienza a perder transparencia. Si no se controla la cristalización, se desarrollarán esfuerzos que harán que el vidrio se fracture.

Por otra parte, la **cristalización** de los vidrios puede controlarse. Los científicos y los ingenieros en materiales, como Donald Stookey [Fig. 3-8(a)], han desarrollado formas de nuclear en forma deliberada cristales ultrafinos en vidrios amorfos. Los materiales obtenidos se llaman **vitrocerámicas** [Fig. 3-8(b)], pueden hacerse hasta $\sim 99.9\%$ cristalinos y son bastante resistentes. Algunas vitrocerámicas se pueden hacer ópticamente transparentes manteniendo extremadamente pequeño el tamaño de los cristales ($\sim <100\text{ nm}$). La mayor ventaja de las vitrocerámicas es que se moldean con las técnicas de conformación del vidrio, pero no se fracturan como el vidrio.[4] Describiremos este tema con más detalle en el capítulo 8.

Igual que los vidrios inorgánicos, muchos plásticos también son amorfos. Aunque pueden contener pequeñas porciones de material cristalino. Durante su procesamiento, las cadenas relativamente grandes de moléculas de polímero se enredan entre sí, como el espagueti. Las moléculas de polímero enredadas no se organizan para formar materiales cristalinos. Durante el procesamiento de polímeros se aplican esfuerzos mecánicos a la preforma de la botella, por ejemplo, en la manufactura de una botella normal de dos litros para bebida gaseosa, con plástico de tereftalato de polietileno PET (*polyethylene terephthalate*). Este proceso se llama **moldeado por soplado y estirado** (Fig. 3-9). Los esfuerzos radiales (soplado) y longitudinales (**estirado**) durante la formación de la botella desenrollan algunas de las cadenas de polímero, causando **cristalización inducida por esfuerzo**. La formación de cristales aumenta la resistencia de las botellas de PET. Igual que en el caso de las vitrocerámicas, se debe controlar el proceso de cristalización para que los cristales refuercen en realidad al plástico PET, pero que no sean demasiado grandes como para dispersar la luz y perjudicar la transparencia.

En comparación con los plásticos y los vidrios inorgánicos, los metales y las aleaciones tienden a formar materiales cristalinos con bastante facilidad. Por lo tanto, para formar estructuras amorfas en estos materiales, es decir, **vidrios metálicos** se requieren velocidades de enfriamiento del metal líquido $>10^6^\circ\text{C/s}$. Esta técnica de enfriar muy rápidamente los metales y aleaciones se llama **solidificación rápida**. Muchos vidrios metálicos tienen propiedades que son a la vez útiles y excepcionales. Algunos, como Metglas™, tienen aplicaciones comerciales

¹ N. del T.: En realidad, se usa carbonato de sodio, Na_2CO_3 .



(a)



(b)

Figura 3-8 (a) Donald Stookey, a quien se le acreditan investigaciones precursoras sobre vitrocerámicas. (b) Obtenidas a partir de vidrios amorfos, las vitrocerámicas representan una familia útil de materiales diseñados. (Cortesía de Corning Corporation.)

como materiales magnéticos más eficientes, para transformadores y otras aplicaciones. El tema de solidificación se discutirá más a fondo en el capítulo 8.

El silicio amorfo, llamado a:Si-H, es otro ejemplo importante que tiene el orden básico de corto alcance del silicio cristalino (Fig. 3-10).[5] La H del símbolo indica que este material también contiene algo de hidrógeno. En el silicio amorfo, los tetraedros de silicio no están unidos entre sí en el arreglo periódico que tiene el silicio cristalino. Algunos enlaces también están incompletos o "abiertos". Esta falta de arreglo periódico disminuye la movilidad de los portadores

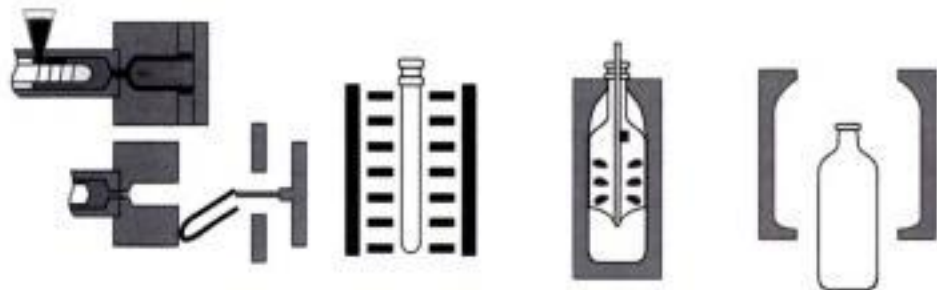


Figura 3-9 La figura superior muestra una botella normal de dos litros, y una preforma con la que se produce la botella. La figura inferior muestra un esquema del proceso de formado por soplado y estirado para fabricar una botella normal de dos litros de PET (tereftalato de polietileno) a partir de una preforma. El esfuerzo inducido en la cristalización causa la formación de cristales pequeños que contribuyen a reforzar el resto de la matriz amorfa. (Fuente: proceso de fabricación de botellas en paysmart.com/usedcentral/.)

—es decir, la velocidad con la que se mueven los portadores de carga, que pueden ser electrones, bajo un campo eléctrico— en el silicio amorfo, en comparación con el silicio cristalino. Sin embargo, el silicio amorfo se puede fabricar sobre sustratos de mayor área que el silicio cristalino; esto es fundamental en las aplicaciones electrónicas. El silicio amorfo se fabrica por **deposición química de vapor** que implica descomponer el silano (SiH_4) gaseoso. Este proceso representa un ejemplo de producción de materiales amorfos sin fusión. Durante este proceso, los átomos de silicio del silano precursor se depositan sobre un sustrato y no tienen oportunidad de formar silicio cristalino. Las capas delgadas de silicio amorfo se usan en la fabricación de transistores para pantallas de matriz activa en las computadoras. También se usa mucho el silicio amorfo en aplicaciones como celdas solares y tableros solares.

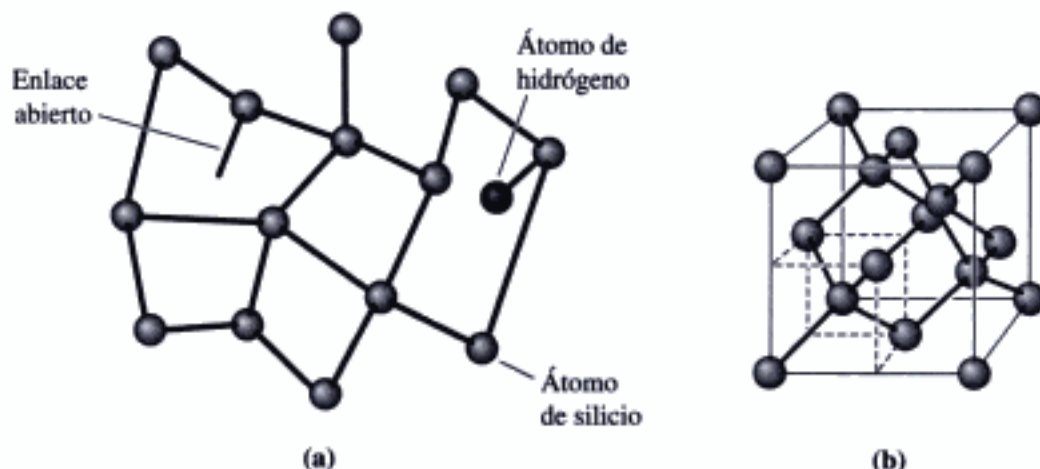


Figura 3-10 Arreglos atómicos en el silicio cristalino y en el silicio amorfo. (a) Silicio amorfo. (b) Silicio cristalino. Obsérvese la variación en la distancia interatómica en el silicio amorfo.

Los (o las)² geles como los de sílice coloidal también son ejemplos de materiales amorfos. Estos materiales como gelatina se usan en fórmulas de cosméticos, para moldes de colado de precisión para metales y aleaciones, en pinturas y productos farmacéuticos.

Resumiendo, los materiales amorfos se pueden obtener restringiendo a los átomos o iones para que no ocupen sus posiciones periódicas “regulares”. Esto significa que los materiales amorfos no tienen orden de largo alcance. Eso nos permite obtener materiales con muchas propiedades distintas y excepcionales. Muchos materiales que se consideran como “amorfos” pueden contener algún grado de cristalinidad. Como los átomos están dispuestos en posiciones que no son de equilibrio, la tendencia natural de un material amorfo es cristalizar; ya que eso conduce a un material con mayor estabilidad termodinámica. Esto se puede hacer proporcionando una fuerza motriz adecuada, que puede ser térmica (como en un vidrio de silicato), termomecánica (como en polímeros PET) o eléctrica (como en polímeros de cristal líquido). Los materiales amorfos y los cristalinos obtenidos a partir de los primeros tienen muchas aplicaciones tecnológicas útiles.

3-3

Redes, celdas unitarias, bases y estructuras cristalinas

Una **red** es una colección de puntos, llamados **puntos de red**, ordenados en un patrón periódico de tal modo que los alrededores de cada punto de la red son idénticos. Una red puede ser uni, bi o tridimensional. En la ciencia e ingeniería de los materiales se usa el concepto de “red” para describir los arreglos de átomos o de iones. Un grupo de uno o más átomos ubicados en forma determinada entre sí, y asociados con cada punto de red, se llama **motivo**, **motif** o **base**. Se obtiene una **estructura cristalina** sumando la red y la base; es decir: estructura cristalina = red + base.

La **celda unitaria** es la subdivisión de una red que sigue conservando las características generales de toda la red. En la figura 3-11 se muestran celdas unitarias. Al apilar celdas unitarias idénticas se puede construir toda la red. Hay siete arreglos únicos, llamados **sistemas cristalinos**, que llenan el espacio tridimensional. Son los sistemas cúbico, tetragonal, ortorrómbico, romboédrico (que también se llama trigonal), hexagonal, monoclinico y triclínico. Aunque existen estos siete sistemas cristalinos, hay un total de 14 arreglos distintos de puntos de red. Son arreglos

² N. del T.: Por ejemplo, *el* gel del proceso sol-gel, y *la* gel de sílice. También, en ambos ejemplos se puede usar “el” o “la”.

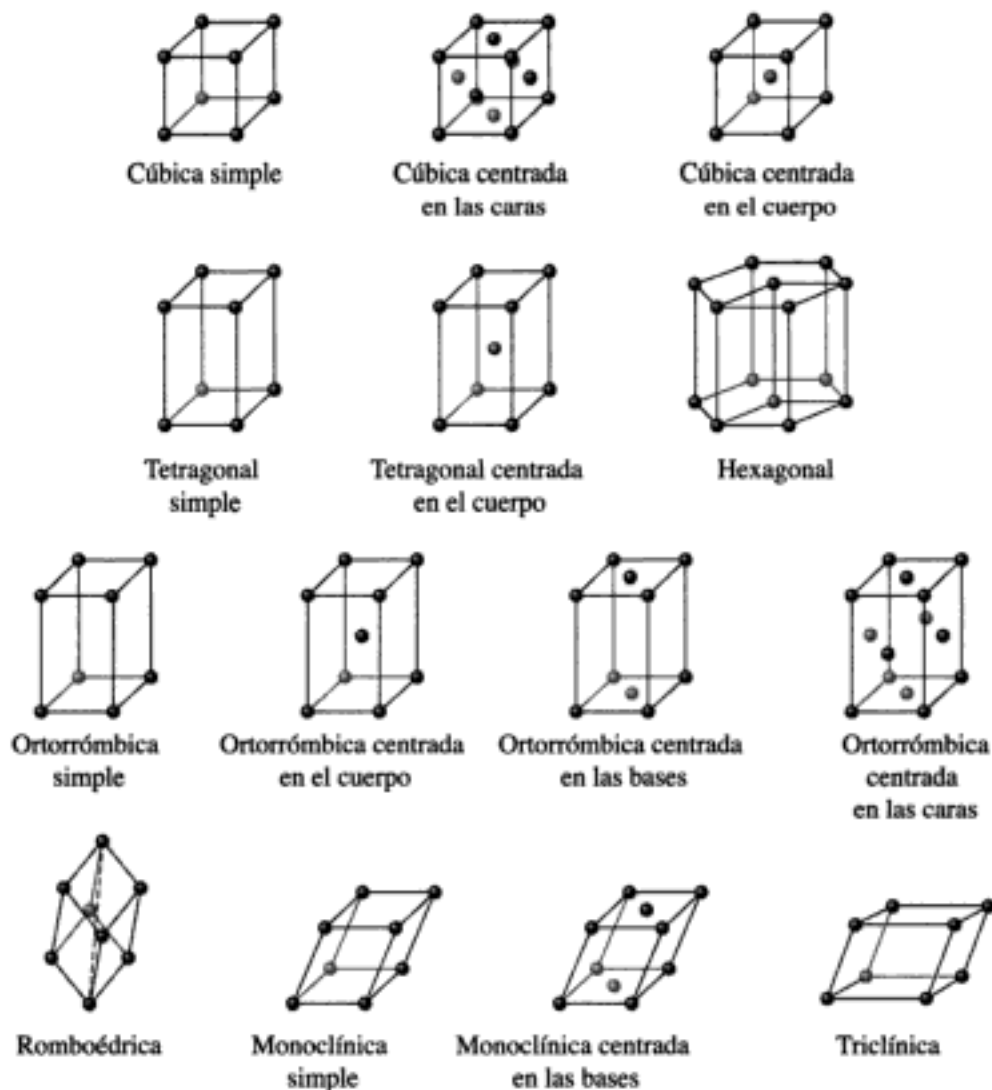


Figura 3-11 Los catorce tipos de redes de Bravais, agrupados en siete sistemas cristalinos. En las figuras 3-12 y 3-16 se muestra la celda unitaria real para un sistema hexagonal.

únicos que se llaman **redes de Bravais**, en honor del francés Auguste Bravais (1811-1863), uno de los primeros cristalógrafos. Se identifican 14 tipos de redes de Bravais agrupados en siete sistemas cristalinos (Fig. 3-11 y tabla 3-1). Los puntos de red están en las esquinas de las celdas unitarias y, en algunos casos, en las caras o en el centro de la celda unitaria. Obsérvese que para el sistema cristalino cúbico existen redes de Bravais cúbica simple (SC, *simple cubic*), cúbica centrada en las caras (FCC, *face-centered cubic*) y cúbica centrada en el cuerpo (BCC, *body-centered cubic*). En forma parecida, para el sistema cristalino tetragonal existen las redes tetragonal simple y tetragonal centrada en el cuerpo. Se puede expresar cualquier otro arreglo de átomos con las 14 redes de Bravais. Obsérvese que el concepto de red es matemático y que no se mencionan átomos, iones o moléculas. Sólo cuando se toma una red de Bravais y se comienza a definir la base —es decir, uno o más átomos asociados con cada punto de red—, se puede describir una estructura cristalina. Por ejemplo, si se toma la red cúbica centrada en las caras y se supone que cada punto de red tiene un átomo, se obtiene la estructura cristalina cúbica centrada en las caras.

Obsérvese que aunque sólo hay 14 redes de Bravais, se pueden tener muchas bases más. Como la estructura cristalina se obtiene sumando red y base, se tienen cientos de estructuras

TABLA 3-1 ■ Características de los siete sistemas cristalinos

Estructura	Ejes	Ángulos entre ejes	Volumen de la celda unitaria
Cúbica	$a = b = c$	Todos los ángulos iguales a 90°	a^3
Tetragonal	$a = b \neq c$	Todos los ángulos iguales a 90°	a^2c
Ortorrómica	$a \neq b \neq c$	Todos los ángulos iguales a 90°	abc
Hexagonal	$a = b \neq c$	Dos ángulos de 90° . Un ángulo de 120°	$0.866a^2c$
Romboédrica o trigonal	$a = b = c$	Todos los ángulos son iguales y ninguno es de 90° .	$a^3\sqrt{1 - 3\cos^2\alpha + 2\cos^3\alpha}$
Monoclínica	$a \neq b \neq c$	Dos ángulos de 90° . Un ángulo (β) no es igual a 90°	$abc \sin \beta$
Triclínica	$a \neq b \neq c$	Todos los ángulos son distintos y ningún ángulo es igual a 90°	$abc\sqrt{1 - \cos^2\alpha - \cos^2\beta - \cos^2\gamma + 2\cos\alpha\cos\beta\cos\gamma}$

cristalinas distintas. Muchos materiales distintos pueden tener la misma estructura cristalina. Por ejemplo, el cobre y el níquel tienen la estructura cristalina cúbica centrada en las caras. En este libro, para simplificar, supondremos que cada punto de red tiene solamente un átomo —es decir, que la base es uno—, a menos que se mencione otra cosa. Esta hipótesis permite decir red y estructura cristalina en forma equivalente. Ahora describiremos algunas características de una red o celda unitaria.

Parámetros de red Los **parámetros de red**, que describen el tamaño y la forma de la celda unitaria, incluyen las dimensiones de las aristas de la celda unitaria y los ángulos entre éstas (Fig. 3-12). En un sistema cristalino cúbico, sólo se necesita la longitud de uno de los lados del cubo para describir en forma completa la celda (se suponen ángulos de 90° , a menos que se diga otra cosa). Esta longitud es el parámetro de red a (que a veces se le llama a_0). La longitud se expresa en nanómetros (nm) o en unidades angstrom ($\text{\AA}$), donde:

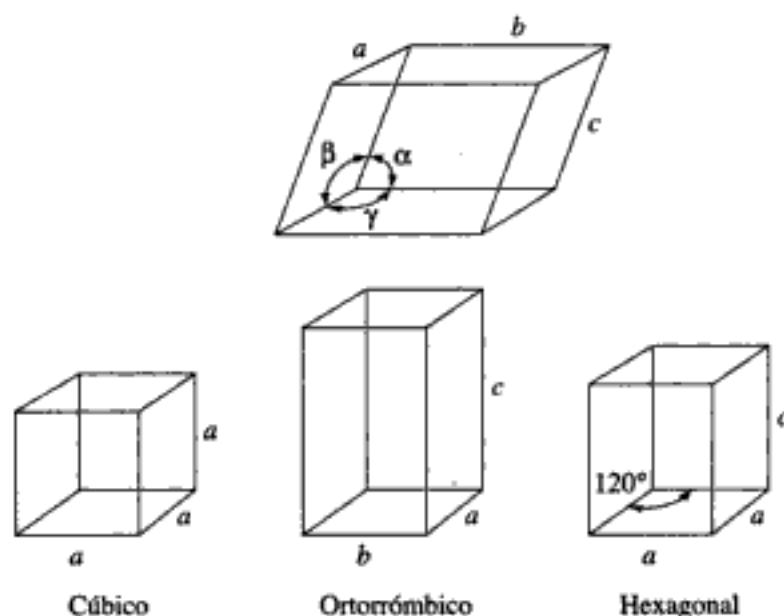


Figura 3-12 Definición de los parámetros de red y su aplicación en los sistemas cristalinos cúbico, ortorrómico y hexagonal.

$$1 \text{ nanómetro (nm)} = 10^{-9} \text{ m} = 10^{-7} \text{ cm} = 10 \text{ Å}$$

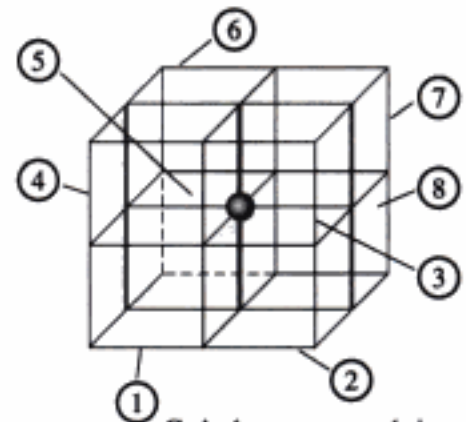
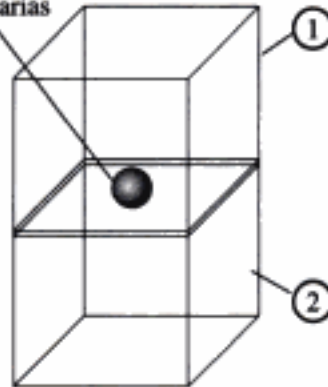
$$1 \text{ angstrom (Å)} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m} = 10^{-8} \text{ cm}$$

Se requieren varios parámetros de red para definir el tamaño y la forma de celdas unitarias complicadas. Para una celda unitaria ortorrómbica se deben especificar las dimensiones de sus tres lados: a_0 , b_0 y c_0 . Las celdas unitarias hexagonales requieren dos dimensiones, a_0 y c_0 , y el ángulo de 120° entre los ejes a_0 . La celda más complicada es la triclinica, que se describe con tres longitudes y tres ángulos.

Cantidad de átomos por celda unitaria Cada una de las celdas unitarias se define con una cantidad específica de puntos de red. Por ejemplo, los vértices de las celdas se identifican con facilidad, así como las posiciones centrada en el cuerpo (centro de la celda) y centrada en las caras (centros de los seis lados de la celda) (Fig. 3-11). Cuando se cuenta la cantidad de puntos de red que pertenece a cada celda, se debe tener en cuenta que esos puntos de red pueden estar compartidos por más de una celda unitaria. Un punto de red en un vértice de una celda unitaria está compartido con siete celdas unitarias adyacentes —y, en consecuencia, compartido por un total de ocho celdas—; sólo un octavo de cada vértice pertenece a determinada celda unitaria. Así, la cantidad de puntos de red de todas las posiciones en vértices de una celda unitaria es:

$$\left(\frac{1 \text{ punto de red}}{8 \text{ vértice}} \right) \left(8 \frac{\text{vértices}}{\text{celda}} \right) = 1 \frac{\text{punto de red}}{\text{celda unitaria}}$$

Átomo centrado en la cara, compartido entre dos celdas unitarias



(a)

Cada átomo en un vértice es compartido por ocho celdas unitarias (1-4 en el frente, 5-8 atrás)



Cúbica simple



Cúbica centrada en el cuerpo



Cúbica centrada en las caras

(b)

Figura 3-13 (a) Ilustración de la distribución de los átomos en caras y vértices. (b) Los modelos de celdas unitarias cúbica simple (SC), cúbica centrada en el cuerpo (BCC) y cúbica centrada en las caras (FCC), suponiendo que hay un sólo átomo por punto de red.

Obsérvese que desde el punto de vista matemático no se puede dividir un punto. Esto significa que el átomo que está en un punto de red se puede considerar como compartido entre celdas unitarias. Los vértices equivalen a $1/8$ de un punto, las caras a $1/2$ y las posiciones centradas en el cuerpo contribuyen con un punto completo [Fig. 3-13(a)].

La cantidad de átomos por celda unitaria es igual al producto de la cantidad de átomos por punto de red por la cantidad de puntos de red por celda unitaria. En la mayoría de los metales, hay un átomo ubicado en cada punto de red. Las estructuras de las celdas unitarias cúbica simple (SC), cúbica centrada en el cuerpo (BCC) y cúbica centrada en las caras (FCC), que tienen un átomo ubicado en cada punto de red, se ven en la figura 3-13(b). En estructuras más complicadas, en especial en materiales poliméricos, cerámicos y biológicos, se pueden asociar varios átomos con cada punto de red —es decir, la base es mayor que uno— y se forman celdas unitarias muy complicadas. En el ejemplo 3-1 se ilustra cómo determinar la cantidad de puntos de red en sistemas cristalinos cúbicos.

EJEMPLO 3-1

Determinación de la cantidad de puntos de red en sistemas cristalinos cúbicos

Calcule la cantidad de puntos de red por celda en los sistemas cristalinos cúbicos. Si sólo hay un átomo en cada punto de red, calcule la cantidad de átomos por celda unitaria.

SOLUCIÓN

En la celda unitaria SC, los puntos de red sólo están en los vértices del cubo:

$$\frac{\text{punto de red}}{\text{celda unitaria}} = (8 \text{ vértices}) \left(\frac{1}{8} \right) = 1$$

En las celdas unitarias BCC, los puntos de red están en los vértices y en el centro del cubo:

$$\frac{\text{punto de red}}{\text{celda unitaria}} = (8 \text{ vértices}) \left(\frac{1}{8} \right) + (1 \text{ centro}) (1) = 2$$

En las celdas unitarias FCC, los puntos de red están en los vértices y en las caras del cubo:

$$\frac{\text{punto de red}}{\text{celda unitaria}} = (8 \text{ vértices}) \left(\frac{1}{8} \right) + (6 \text{ caras}) \left(\frac{1}{2} \right) = 4$$

Como se supone que solamente hay un átomo en cada punto de red, la cantidad de átomos por celda unitaria sería 1, 2 y 4, para las celdas unitarias cúbica simple, cúbica centrada en el cuerpo y cúbica centrada en las caras, respectivamente.

Radio atómico versus parámetros de red En la celda unitaria, las direcciones a lo largo de las cuales los átomos están en contacto continuo son **direcciones de empaquetamiento compacto** o “**direcciones compactas**”. En las estructuras simples, en especial en las que sólo hay un átomo por punto de red, se utilizan esas direcciones para calcular la relación entre el tamaño aparente del átomo y el tamaño de la celda unitaria. Al determinar geométricamente la longitud de la dirección con base en los parámetros de red, y a continuación incluyendo el número de **radios atómicos** a lo largo de esta dirección, se puede determinar la relación que se desee. En el ejemplo 3-2 se demuestra cómo se determinan las relaciones entre los parámetros de red y el radio atómico.

EJEMPLO 3-2**Determinación de la relación entre el radio atómico y los parámetros de red**

Determine la relación entre el radio atómico y el parámetro de red en las estructuras SC, BCC y FCC cuando se tiene un átomo en cada punto de red.

SOLUCIÓN

Si se observa la figura 3-14, se encuentra que los átomos se tocan a lo largo de la arista del cubo en las estructuras SC. Los átomos de los vértices tienen su centro en ellas, así que

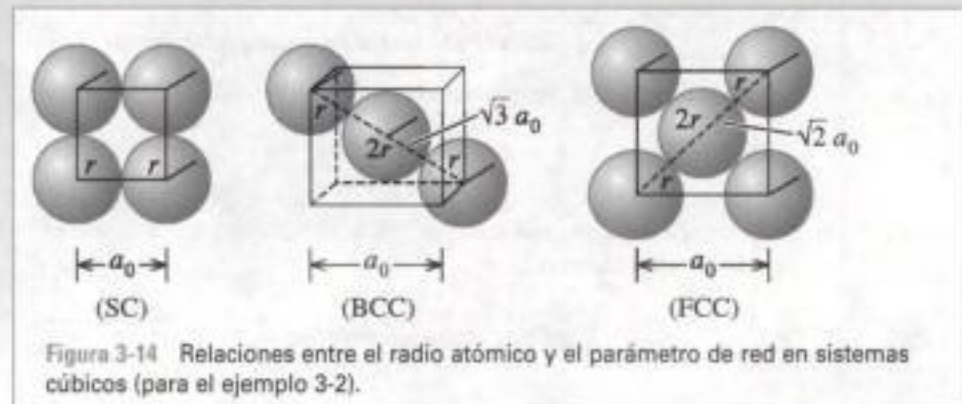
$$a_0 = 2r \quad (3-1)$$

En las estructuras BCC, los átomos se tocan a lo largo de la diagonal del cuerpo, que tiene una longitud $\sqrt{3}a_0$. Hay dos radios atómicos desde el centro del átomo y un radio atómico desde cada uno de los átomos de los vértices en la diagonal del cuerpo, así que

$$a_0 = \frac{4r}{\sqrt{3}} \quad (3-2)$$

En las estructuras FCC, los átomos se tocan a lo largo de la diagonal de la cara del cubo, cuya longitud es $\sqrt{2}a_0$. Hay cuatro radios atómicos a lo largo de esta longitud: dos del átomo centrado en la cara y uno desde cada vértice, así que

$$a_0 = \frac{4r}{\sqrt{2}} \quad (3-3)$$



Número de coordinación El **número de coordinación** es la cantidad de átomos que tocan a determinado átomo, o sea la cantidad de vecinos más cercanos a ese átomo en particular. Es una medida de qué tan compacto y eficiente es el empaquetamiento de los átomos. Para los sólidos iónicos, el número de coordinación de los cationes se define como la cantidad de aniones más cercanos. El número de coordinación de los aniones es la cantidad de los cationes más cercanos. En la sección 3-7 se describirán las estructuras cristalinas de distintos sólidos iónicos y otros materiales.

En las estructuras cúbicas que sólo contienen un átomo por punto de red, los átomos tienen un número de coordinación que se relaciona con la estructura de la red. Al inspeccionar las celdas unitarias de la figura 3-15, se observa que cada átomo en la estructura SC tiene un número de coordinación seis, mientras que en la estructura BCC cada átomo tiene ocho vecinos más próximos. En la sección 3-5, se mostrará que cada átomo en la estructura FCC tiene un número de coordinación de 12, que es el máximo.

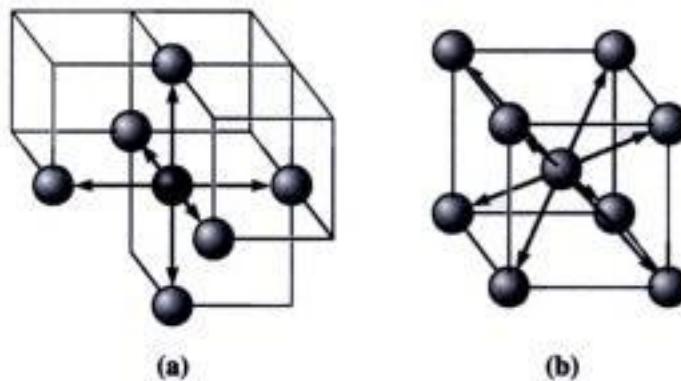


Figura 3-15

Ilustración de los números de coordinación en celdas unitarias (a) SC y (b) BCC. En la SC seis átomos tocan a cada átomo, mientras que en la celda unitaria BCC ocho átomos tocan a cada átomo.

Factor de empaquetamiento El **factor de empaquetamiento** es la fracción de espacio ocupada por átomos, suponiendo que son esferas duras que tocan a su vecino más cercano. La ecuación general del factor de empaquetamiento es:

$$\text{Factor de empaquetamiento} = \frac{(\text{cantidad de átomos/celda}) (\text{volumen de átomos})}{\text{volumen de la celda unitaria}} \quad (3-4)$$

En el ejemplo 3-3 se ilustra cómo calcular el factor de empaquetamiento para una celda FCC.

EJEMPLO 3-3

Cálculo del factor de empaquetamiento

Calcule el factor de empaquetamiento de la celda FCC.

SOLUCIÓN

En la celda FCC hay cuatro puntos de red por celda; si hay un átomo por punto de red, también hay cuatro átomos por celda. El volumen de un átomo es $\frac{4}{3}\pi r^3$, y el volumen de la celda unitaria es a_0^3 .

$$\text{Factor de empaquetamiento} = \frac{(4 \text{ átomos/celda}) \left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)}{a_0^3}$$

Como $a_0 = 4r/\sqrt{2}$; para las celdas unitarias FCC:

$$\text{Factor de empaquetamiento} = \frac{(4) \left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)}{(4r/\sqrt{2})^3} = \frac{\pi}{\sqrt{8}} \approx 0.74$$

El factor de empaquetamiento de $\pi/\sqrt{18} \approx 0.74$ en la celda unitaria representa el empaquetamiento más eficiente posible. Las celdas BCC tienen un factor de empaquetamiento de 0.68 y las SC de 0.52. Observe que el factor de empaquetamiento es independiente del radio de los átomos, siempre y cuando se suponga que todos los átomos tengan un radio fijo. Lo que significa es que no importa que se estén empaquetando átomos en celdas unitarias, balones de básquetbol o pelotas de tenis en una caja cúbica; ¡el máximo factor de empaquetamiento que se puede tener es $\pi/\sqrt{18}$! Este concepto de geometría discreta se llama **conjetura de Kepler**. Johannes Kepler la propuso desde 1611, y quedó sin demostrar hasta 1998, cuando Thomas C. Hales demostró que en realidad es cierta.[6]

El arreglo FCC representa una **estructura con empaquetamiento compacto** (CP, por sus siglas en inglés); es decir, la fracción de empaquetamiento es la máxima posible con átomos de un tamaño. Las estructuras SC y BCC son relativamente abiertas. En la siguiente sección veremos que es posible tener una estructura hexagonal con la misma eficiencia de empaquetamiento que la FCC. Esta última se llama **estructura hexagonal compacta** (HCP, por sus siglas en inglés). Los metales con enlaces metálicos únicamente se empaquetan con la máxima eficiencia posible. Los que tienen enlaces mezclados, como el hierro, pueden tener celdas unitarias con un factor de empaquetamiento menor que el máximo. Ninguno de los metales o aleaciones comunes diseñados tienen la estructura SC, pero esa estructura sí se encuentra en los materiales cerámicos.

Densidad La **densidad** teórica de un material se puede calcular con las propiedades de su estructura cristalina. La fórmula general es:

$$\text{Densidad } \rho = \frac{(\text{cantidad de átomos/celda}) (\text{masa atómica})}{(\text{volumen de la celda unitaria}) (\text{número de Avogadro})} \quad (3-5)$$

Si un material es iónico y consiste en distintas clases de átomos o iones, habrá que modificar esta fórmula para reflejar esas diferencias. En el ejemplo 3-4 se ilustra cómo determinar la densidad del hierro BCC.

EJEMPLO 3-4

Determinación de la densidad del hierro BCC

Determine la densidad del hierro BCC, cuyo parámetro de red es 0.2866 nm.

SOLUCIÓN

Para una celda BCC,

$$\text{Átomos/celda} = 2$$

$$a_0 = 0.2866 \text{ nm} = 2.866 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

$$\text{Masa atómica} = 55.847 \text{ g/mol}$$

$$\text{Volumen de la celda unitaria} = a_0^3 = (2.866 \times 10^{-8} \text{ cm})^3 = 23.54 \times 10^{-24} \text{ cm}^3/\text{celda}$$

$$\text{Número de Avogadro } N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ átomos/mol}$$

$$\text{Densidad } \rho = \frac{(\text{cantidad de átomos/celda}) (\text{masa atómica del hierro})}{(\text{volumen de la celda unitaria}) (\text{número de Avogadro})}$$

$$\rho = \frac{(2) (55.847)}{(23.54 \times 10^{-24}) (6.02 \times 10^{23})} = 7.882 \text{ g/cm}^3$$

La densidad medida es 7.870 g/cm³. La pequeña discrepancia entre las densidades teórica y medida es una consecuencia de los defectos en el material. Como se dijo antes, el término "defecto", en este contexto, significa imperfecciones respecto al arreglo atómico.

La estructura hexagonal compacta Una forma especial de la estructura hexagonal, la hexagonal compacta (HCP) se muestra en la figura 3-16. La celda unitaria es el prisma oblicuo que se muestra por separado. Esta estructura HCP tiene un punto de red por celda, uno de cada uno de los ocho vértices del prisma, pero con cada punto de red se asocian dos átomos. Un átomo está en un vértice y el segundo está dentro de la celda unitaria. En consecuencia, la base es 2.

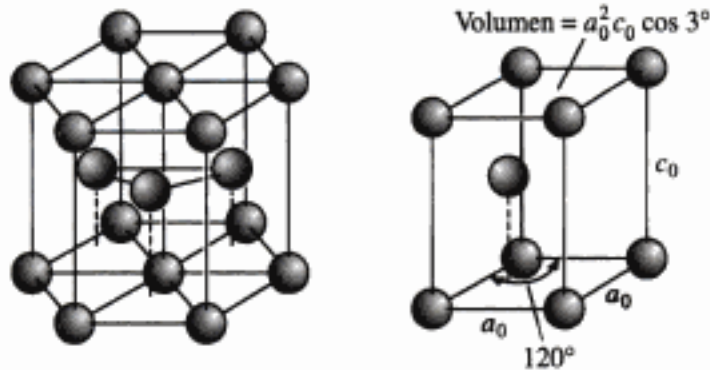


Figura 3-16
La estructura hexagonal compacta HCP (izquierda) y su celda unitaria.

TABLA 3-2 ■ Propiedades de la estructura cristalina de algunos metales

Estructura	a_0 en función de r	Átomos por celda	Número de coordinación	Factor de empaquetamiento	Ejemplos
Cúbica simple (SC)	$a_0 = 2r$	1	6	0.52	Polonio (Po), Mn- α
Cúbica centrada en el cuerpo (BCC)	$a_0 = 4r/\sqrt{3}$	2	8	0.68	Fe, Ti, W, Mo, Nb, Ta, K, Na, V, Zr, Cr
Cúbica centrada en las caras (FCC)	$a_0 = 4r/\sqrt{2}$	4	12	0.74	Fe, Cu, Au, Pt, Ag, Pb, Ni
Hexagonal compacta (HCP)	$a_0 = 2r$ $c_0 \approx 1.633a_0$	2	12	0.74	Ti, Mg, Zn, Be, Co, Zr, Cd

En los metales con una estructura HCP ideal, los ejes a_0 y c_0 se relacionan en la forma $c_0/a_0 = 1.633$. Sin embargo, la mayoría de los metales HCP tienen relaciones c_0/a_0 un poco diferentes del valor ideal, por los enlaces mixtos. Debido a que la estructura HCP, al igual que la FCC, tiene el factor más eficiente de empaquetamiento de 0.74 y un número de coordinación de 12, varios metales la poseen. La tabla 3-2 es un resumen de las características de estructuras cristalinas de algunos metales.

Las estructuras de materiales enlazados en forma iónica se pueden considerar como formadas por el empaquetamiento (cúbico o hexagonal) de aniones. Los cationes entran en los sitios o huecos intersticiales que quedan después de empaquetarse los aniones. En la sección 3-7 se describe esto con mayor detalle.

34 Transformaciones alotrópicas o polimorfas

Los materiales que pueden tener más de una estructura cristalina se llaman alotrópicos, polimorfos o polimórficos. El término **alotropía** suele reservarse para este comportamiento en los elementos puros, mientras que **polimorfismo** se usa para los compuestos. El lector habrá notado que en la tabla 3-2 hay algunos metales, como el hierro y el titanio, que tienen más de una estructura cristalina. A bajas temperaturas, el hierro tiene la estructura BCC, pero a mayores temperaturas se transforma en una estructura FCC. Estas transformaciones dan como resultado cambios en las propiedades de los materiales y son la base del tratamiento térmico de los aceros y de muchas otras aleaciones.

Muchos materiales cerámicos, como la sílice (SiO_2) y la zirconia (anhídrido de zirconia, dióxido de zirconio u óxido de zirconio, ZrO_2), también son polimórficos. Durante su calen-

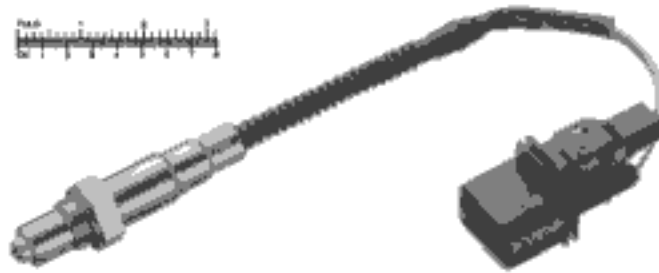


Figura 3-17

Los sensores de oxígeno gaseoso que se usan en automóviles y en otras aplicaciones se basan en composiciones de zirconia estabilizada. (Imagen cortesía de Bosch © Robert Bosch GmbH.)

tamiento o enfriamiento, la transformación puede acompañarse de un cambio de volumen; si no se controla en forma adecuada, este cambio de volumen hace que el material cerámico, que es frágil, se agriete y fracture. Por ejemplo, para la zirconia (ZrO_2), la forma estable a temperatura ambiente de $\sim 25^\circ C$ es la monoclinica. Al aumentar la temperatura, hay estructuras cristalinas más simétricas que se vuelven estables. A $1170^\circ C$, la zirconia monoclinica se transforma a una estructura tetragonal. La forma tetragonal es estable hasta $2370^\circ C$, punto en el cual se transforma en una forma cúbica. La forma cúbica queda estable desde $2370^\circ C$ hasta la temperatura de fusión de $2680^\circ C$. [7] La zirconia también puede tener una forma ortorrómbica, cuando se le aplican grandes presiones.

Los componentes cerámicos hechos de zirconia pura suelen fracturarse al bajar su temperatura, cuando la zirconia se transforma de tetragonal a monoclinica, debido a la expansión volumétrica (el cambio de fase cúbica a tetragonal no causa mucho cambio en volumen). El resultado es que no se usan polimorfos monoclinicos o tetragonales puros de zirconia. En su lugar, los científicos y los ingenieros en materiales han encontrado que agregando dopantes como itria (Y_2O_3) es posible estabilizar la fase cúbica de la zirconia, aun a temperatura ambiente. La zirconia estabilizada con itria (YSZ) contiene hasta 8% mol de Y_2O_3 . Se obtiene un efecto estabilizador parecido usando CaO , y a la resultante se le llama zirconia estabilizada con calcia (CSZ). [8] Las formulaciones con zirconia total o parcialmente estabilizada tienen muchas aplicaciones, como recubrimientos de barrera térmica para álabes de turbina y electrolitos para sensores de oxígeno, así como celdas de combustible de óxido sólido. Casi todo automóvil que se fabrica hoy usa un sensor de oxígeno fabricado con formulaciones de zirconia estabilizada (Fig. 3-17). La zirconia conduce la electricidad por el movimiento de los iones de oxígeno. En un sensor de oxígeno se produce una señal de voltaje a través de la zirconia usando presiones parciales de oxígeno: una presión parcial patrón de oxígeno y una presión parcial variable de oxígeno en la mezcla aire-combustible. El voltaje producido indica la pobreza o la riqueza de la mezcla aire-combustible. Esto permite usar el combustible de la manera más eficiente. El sensor de zirconia es sólo un ejemplo de la forma en que los científicos e ingenieros en materiales desarrollan materiales y dispositivos para beneficio de la sociedad y al mismo tiempo optimizan el uso de los recursos naturales y limitan la contaminación ambiental. También es muy posible que algunos de los automóviles que están por venir tengan sistemas de celda de combustible a base de zirconia.

La transformación de zirconia tetragonal a monoclinica se aprovecha para aumentar la tenacidad de los materiales cerámicos. Tenacidad significa la capacidad que tiene un material de absorber una cantidad considerable de energía antes de romperse. En esos materiales, la dilatación relacionada con el cambio de zirconia tetragonal a monoclinica ayuda a generar un esfuerzo de compresión enfrente de la punta de una grieta. Esto ayuda a aumentar la tenacidad de un material cerámico que contenga partículas o granos de zirconia de tamaño adecuado.

El polimorfismo también tiene importancia central en varias otras aplicaciones. Las propiedades de algunos materiales pueden depender mucho del tipo de polimorfo. Por ejemplo, las propiedades dieléctricas de materiales como PZT (zirconato-titanato de plomo) y $BaTiO_3$ (titanato de bario) dependen de la forma polimórfica de que se trate. En el ejemplo 3-5 se observa cómo calcular los cambios de volumen en los polimorfos de zirconia. El ejemplo 3-6 describe el grado de los cambios de volumen que pueden presentarse durante las transformaciones.

EJEMPLO 3-5**Cálculo de cambios de volumen en polimorfos de zirconia**

Calcule el cambio volumétrico porcentual cuando la zirconia pasa de una estructura tetragonal a una monoclinica.[9] Las constantes de red para las celdas unitarias monoclinicas son: $a = 5.156$, $b = 5.191$ y $c = 5.304$ Å, respectivamente. El ángulo β , de la celda unitaria monoclinica es 98.9° . Para la celda unitaria tetragonal, las constantes de red son $a = 5.094$ y $c = 5.304$ Å, respectivamente.[10] Durante la transformación ¿se expande o se contrae la zirconia? ¿Cuáles son los efectos de esta transformación sobre las propiedades mecánicas de la cerámica de zirconia?

SOLUCIÓN

El volumen de una celda unitaria tetragonal es $V = a^2c = (5.094)^2(5.304) = 134.33$ Å³.

El volumen de una celda unitaria monoclinica es $V = abc \sin \beta = (5.156)(5.191)(5.304) \sin (98.9^\circ) = 140.25$ Å³.

Entonces, hay una expansión de la celda unitaria conforme el ZrO_2 se transforma de tetragonal a monoclinico.

El cambio porcentual de volumen es $= [(\text{volumen final} - \text{volumen inicial})/(\text{volumen inicial})] \times 100 = [(140.25 - 134.33 \text{ Å}^3)/134.33 \text{ Å}^3] \times 100 = 4.21\%$.

La mayoría de los cerámicos son muy frágiles y no pueden resistir un cambio de volumen mayor que 0.1%. En los capítulos 6 y 7 se describirá el comportamiento mecánico de los materiales. Aquí la conclusión es que los cerámicos de ZrO_2 no se pueden usar en su forma monoclinica porque cuando la zirconia pase a la forma tetragonal, casi con seguridad se rompe. Por tanto, el ZrO_2 se estabiliza con frecuencia en una forma cúbica, usando diversos aditivos, como CaO , MgO y Y_2O_3 .

EJEMPLO 3-6**Diseño de un sensor para medir cambio de volumen**

Para estudiar el comportamiento del hierro a temperaturas elevadas, nos gustaría diseñar un instrumento que pueda detectar (con exactitud de 1%) el cambio de volumen de un cubo de hierro de 1 cm³ cuando se calienta pasando por su temperatura de transformación polimórfica. A 911°C , el hierro es BCC con un parámetro de red de 0.2863 nm. A 913°C , es FCC, con parámetro de red de 0.3591 nm. Determine la exactitud que se requiere en el instrumento medidor.

SOLUCIÓN

El cambio de volumen durante la transformación se puede calcular a partir de datos cristalográficos. El volumen de una celda unitaria del hierro BCC antes de transformarlo es:

$$V_{\text{BCC}} = a_0^3 = (0.2863 \text{ nm})^3 = 0.023467 \text{ nm}^3$$

Es el volumen que ocupan dos átomos de hierro, porque hay dos átomos por celda unitaria en la estructura cristalina BCC.

El volumen de la celda unitaria en el hierro FCC es:

$$V_{\text{FCC}} = a_0^3 = (0.3591 \text{ nm})^3 = 0.046307 \text{ nm}^3$$

Pero éste es el volumen que ocupan *cuatro* átomos de hierro, porque hay cuatro átomos por celda unitaria FCC. En consecuencia, se deben comparar dos celdas BCC (con volumen de $2(0.023467) = 0.046934 \text{ nm}^3$) con cada celda FCC. El cambio porcentual de volumen durante la transformación es:

$$\text{Cambio de volumen} = \frac{(0.046307 - 0.046934)}{0.046934} \times 100 = -1.34\%$$

Esto indica que el hierro se contrae al calentarlo durante el intervalo de temperaturas que causa el cambio de BCC a FCC.

El cubo de hierro de 1 cm^3 se contrae a $1 - 0.0134 = 0.9866 \text{ cm}^3$ después de la transformación; en consecuencia, para asegurar una exactitud de 1%, el instrumento debe detectar un cambio de:

$$\Delta V = (0.01)(0.0134) = 0.000134 \text{ cm}^3.$$

3-5 Puntos, direcciones y planos en la celda unitaria

Coordenadas de puntos Se pueden localizar ciertos puntos en la red o celda unitaria, como por ejemplo las posiciones de los átomos, definiendo el sistema de coordenadas de mano derecha de la figura 3-18. La distancia se mide en términos de la cantidad de parámetros de red que hay que recorrer en cada una de las direcciones x , y y z para ir del origen al punto en cuestión. Las coordenadas se escriben como las tres distancias, y los números se separan con comas.

Direcciones en la celda unitaria Hay ciertas direcciones en la celda unitaria que tienen interés especial. Los **índices de Miller** de las direcciones son la notación abreviada para describir esas direcciones. El procedimiento para determinar los índices de Miller de las direcciones es el siguiente:

1. Usar un sistema coordenado de mano derecha y determinar las coordenadas de dos puntos que estén en la dirección.
2. Restar las coordenadas del punto "cola" de las coordenadas de las del punto "cabeza" para obtener la cantidad de parámetros de red recorridos en la dirección de cada eje del sistema de coordenadas.
3. Eliminar las fracciones y/o reducir los resultados obtenidos de la resta, hasta los enteros mínimos.
4. Encerrar los números entre corchetes []. Si se produce un signo negativo, representarlo con una barra o raya sobre el número.

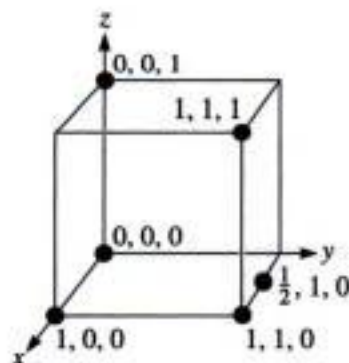


Figura 3-18
Coordenadas de puntos seleccionados en la celda unitaria. El número indica la distancia al origen, en términos de parámetros de red.

En el ejemplo 3-7 se muestra una forma de determinar los índices de Miller de dirección.

EJEMPLO 3-7

Determinación de índices de Miller de direcciones

Determine los índices de Miller de las direcciones A, B y C en la figura 3-19.

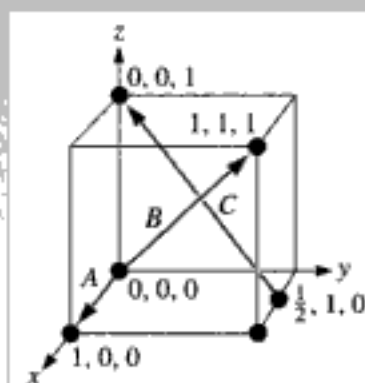


Figura 3-19

Direcciones y coordenadas cristalográficas (para el ejemplo 3-7).

SOLUCIÓN

Dirección A

1. Dos puntos son 1, 0, 0 y 0, 0, 0
2. $1, 0, 0 - 0, 0, 0 = 1, 0, 0$
3. No hay fracciones que eliminar ni enteros que reducir.
4. [100]

Dirección B

1. Dos puntos son 1, 1, 1 y 0, 0, 0
2. $1, 1, 1 - 0, 0, 0 = 1, 1, 1$
3. No hay fracciones que eliminar ni enteros que reducir.
4. [111]

Dirección C

1. Dos puntos son 0, 0, 1 y $\frac{1}{2}, -1, 0$
2. $0, 0, 1 - \frac{1}{2}, -1, 0 = -\frac{1}{2}, -1, 1$
3. $2(-\frac{1}{2}, -1, 1) = -1, -2, 2$
4. $[\bar{1} \bar{2} 2]$

Se deben resaltar algunos puntos acerca del uso de índices de Miller para direcciones:

1. Como las direcciones son vectores, una dirección y su negativa no son idénticas; [100] no es igual que $[\bar{1}00]$; representan la misma línea, pero en direcciones opuestas.
2. Una dirección y su múltiplo son idénticos; [100] es igual que [200]. Simplemente olvidamos reducir hasta los enteros mínimos.
3. Ciertos grupos de direcciones son *equivalentes*; tienen sus índices particulares por la forma en que se definen las coordenadas. Por ejemplo, en un sistema cúbico, una dirección [100] es una dirección [010] si redefinimos el sistema de coordenadas como se observa en la figura 3-20. Se pueden indicar los grupos de direcciones equivalentes

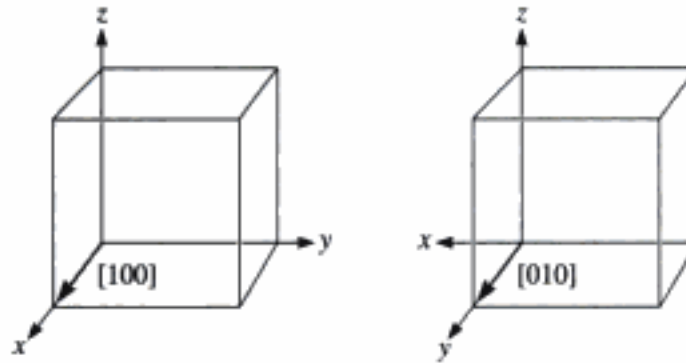


Figura 3-20 Equivalencia de las direcciones cristalográficas de una forma, en sistemas cúbicos.

TABLA 3-3 ■ Direcciones de la familia $\langle 110 \rangle$ en sistemas cúbicos

$$\langle 110 \rangle = \begin{cases} [110] & [\bar{1}\bar{1}0] \\ [101] & [\bar{1}0\bar{1}] \\ [011] & [0\bar{1}\bar{1}] \\ [1\bar{1}0] & [\bar{1}10] \\ [10\bar{1}] & [\bar{1}01] \\ [01\bar{1}] & [0\bar{1}1] \end{cases}$$

como **direcciones de una forma (o familia)**. Se usan los paréntesis especiales $\langle \rangle$ para indicar este conjunto de direcciones. Todas las direcciones de la forma $\langle 100 \rangle$ se observan en la tabla 3-3. Cabe esperar que un material tenga las mismas propiedades en cada una de estas 12 direcciones de la forma $\langle 110 \rangle$.

Importancia de las direcciones cristalográficas Las direcciones cristalográficas se usan para indicar determinada orientación de un solo cristal o de un material policristalino. En muchas aplicaciones, es útil describirlas. Por ejemplo, los metales se deforman con más facilidad en direcciones a lo largo de las cuales los átomos están en contacto más estrecho. Otro ejemplo del mundo real es la dependencia de las propiedades magnéticas del hierro y de otros materiales magnéticos respecto a las direcciones cristalográficas. Es mucho más fácil magnetizar al hierro en la dirección $[100]$ que en las direcciones $[111]$ o $[110]$. Es la razón por la que los granos en los aceros Fe-Si que se usan en aplicaciones magnéticas (por ejemplo, en núcleos de transformadores) estén orientados en la dirección $[100]$ o en sus equivalentes. En el caso de los materiales magnéticos que se usan para medios de grabación, se debe estar seguro de que los granos estén alineados en determinada dirección cristalográfica, de tal modo que la información almacenada no se borre con facilidad. Asimismo, los cristales con los que se fabrican las aspas o álabes de turbinas están alineados en ciertas direcciones para aprovechar sus mejores propiedades mecánicas.

Distancia de repetición, densidad lineal y fracción de empaquetamiento Otra forma de caracterizar las direcciones es con la **distancia de repetición**; es la distancia entre puntos de red a lo largo de la dirección. Por ejemplo, se podría examinar la dirección $[110]$ en una celda unitaria FCC (Fig. 3-21); si se comienza en el lugar 0, 0, 0, el siguiente punto de red está en el centro de una cara; es un sitio $1/2, 1/2, 0$. La distancia entre puntos de red, en consecuencia, es la mitad de la diagonal de la cara, o $\frac{1}{2} \sqrt{2}a_0$. En el cobre, cuyo parámetro de red es 0.36151 nm, la distancia de repetición es 0.2556 nm.

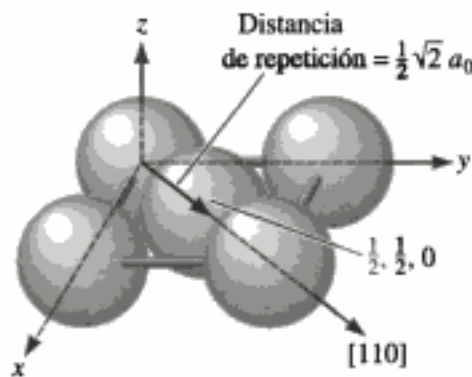


Figura 3-21

Determinación de la distancia de repetición, densidad lineal y fracción de empaquetamiento para una dirección [110] en el cobre FCC.

La **densidad lineal** es la cantidad de puntos de red por unidad de longitud a lo largo de la dirección. En el cobre hay dos distancias de repetición a lo largo de la dirección [110] en cada celda unitaria; como esa distancia es $\sqrt{2}a_0 = 0.51125$ nm, entonces:

$$\text{Densidad lineal} = \frac{2 \text{ distancias de repetición}}{0.51125 \text{ nm}} = 3.91 \text{ puntos de red/nm}$$

Observe que la densidad lineal también es el recíproco de la distancia de repetición.

Por último, se puede calcular la **fracción de empaquetamiento** de determinada dirección, que es la fracción realmente ocupada por átomos. Para el cobre, en el que un átomo está en cada punto de red, esta fracción es igual al producto de la densidad lineal por el doble del radio atómico. Para la dirección [110] en el cobre FCC, el radio atómico es $r = \sqrt{2}a_0/4 = 0.12781$ nm. En consecuencia, la fracción de empaquetamiento es:

$$\begin{aligned} \text{Fracción de empaquetamiento} &= (\text{densidad lineal}) (2r) \\ &= (3.91) (2) (0.12781) \\ &= (1.0) \end{aligned}$$

Los átomos se tocan a lo largo de la dirección [110], porque es una dirección compacta en los metales FCC.

Planos en la celda unitaria Ciertos planos de átomos en un cristal también tienen importancia especial. Por ejemplo, los metales se deforman a lo largo de planos de átomos que estén empaquetados de la manera más compacta. La energía superficial de las distintas caras de un cristal depende de los planos cristalográficos particulares. Esto tiene importancia en el crecimiento de los cristales. En el crecimiento de ciertos materiales electrónicos en forma de películas delgadas (como Si o GaAs), se necesita estar seguro de que el sustrato esté orientado de tal manera que la película delgada pueda crecer en determinado plano cristalográfico.

Para identificar estos planos de importancia, se usan índices de Miller, como notación abreviada, como se observa en el siguiente procedimiento.

1. Identificar los puntos en donde el plano cruza los ejes x, y y z en función de los parámetros de red. Si el plano pasa por el origen, ¡hay que mover el origen del sistema de coordenadas!
2. Sacar los recíprocos de esas intersecciones.
3. Simplificar fracciones, pero *no* reducir a enteros mínimos.
4. Encerrar entre paréntesis () los números que resulten. De nuevo, los números negativos se deben escribir con una raya sobre ellos.

En el siguiente ejemplo se demuestra cómo obtener los índices de Miller de planos.

EJEMPLO 3-8

Determinación de los índices de Miller de planos

Determine los índices de Miller de los planos A, B y C de la figura 3-22.

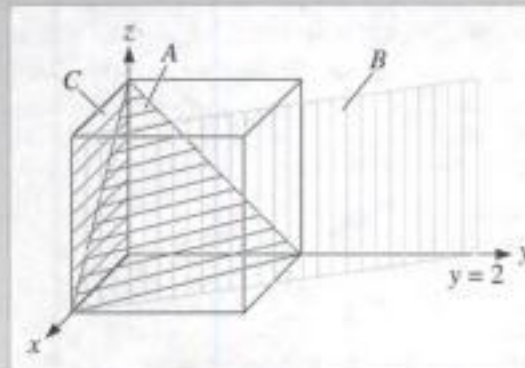


Figura 3-22
Planos cristalográficos y sus intersecciones (para el ejemplo 3-8).

SOLUCIÓN

Plano A

1. $x = 1, y = 1, z = 1$
2. $\frac{1}{x} = 1, \frac{1}{y} = 1, \frac{1}{z} = 1$
3. No hay fracciones que eliminar.
4. (111)

Plano B

1. El plano nunca cruza el eje z , por lo que $x = 1, y = 2$ y $z = \infty$
2. $\frac{1}{x} = 1, \frac{1}{y} = \frac{1}{2}, \frac{1}{z} = 0$
3. Eliminar fracciones: $\frac{1}{x} = 2, \frac{1}{y} = 1, \frac{1}{z} = 0$
4. (210)

Plano C

1. Se debe cambiar el origen, porque el plano pasa por 0, 0, 0. Movámoslo un parámetro de red en dirección y . Entonces $x = \infty, y = -1$ y $z = \infty$.
2. $\frac{1}{x} = 0, \frac{1}{y} = -1, \frac{1}{z} = 0$
3. No hay fracciones que eliminar.
4. (0 $\bar{1}$ 0)

Se deben hacer notar algunos aspectos importantes de los índices de Miller de planos:

1. Los planos y sus negativos son idénticos (éste no fue el caso con las direcciones). En consecuencia, (020) = (0 $\bar{2}$ 0).

2. Los planos y sus múltiplos no son idénticos (de nuevo, es lo contrario de lo que se vio en las direcciones). Esto se puede demostrar definiendo las densidades planares y las fracciones de empaquetamiento planares. La **densidad planar** es la cantidad de átomos cuyos centros están en el plano por unidad de área; la fracción de empaquetamiento es la fracción del área de ese plano que realmente está cubierta por esos átomos. En el ejemplo 3-9 se muestra cómo se pueden calcular estas cantidades.
3. En cada celda unitaria, los **planos de una forma (o familia)** representan grupos de planos equivalentes que tienen sus índices particulares debido a la orientación de las coordenadas. Se representan estos grupos de planos similares con la notación de llaves $\{ \}$. Los planos de la forma $\{110\}$ en los sistemas cúbicos se muestran en la tabla 3-4.
4. En los sistemas cúbicos, una dirección que tiene los mismos índices que un plano es perpendicular a ese plano.

TABLA 3-4 ■ Planos de la familia $\{110\}$ en los sistemas cúbicos

$$\{110\} \begin{cases} (110) \\ (101) \\ (011) \\ (\bar{1}\bar{1}0) \\ (10\bar{1}) \\ (01\bar{1}) \end{cases}$$

Nota: Los negativos de los planos no son planos únicos.

EJEMPLO 3-9

Cálculo de la densidad planar y la fracción de empaquetamiento

Calcule la densidad planar y la fracción de empaquetamiento planar para los planos (010) y (020) en el polonio cúbico simple, cuyo parámetro de red es 0.334 nm.

SOLUCIÓN

Los dos planos se trazan en la figura 3-23. En el plano (010), los átomos tienen su centro en cada vértice de la cara del cubo, y en realidad 1/4 de cada átomo está en la cara de la celda unitaria. Entonces, los átomos totales en cada cara es uno. La densidad planar es:

$$\begin{aligned} \text{Densidad planar (010)} &= \frac{\text{átomos por cara}}{\text{área de la cara}} = \frac{1 \text{ átomo por cara}}{(0.334)^2} \\ &= 8.96 \text{ átomos/nm}^2 = 8.96 \times 10^{14} \text{ átomos/cm}^2 \end{aligned}$$

La fracción de empaquetamiento planar es dada por:

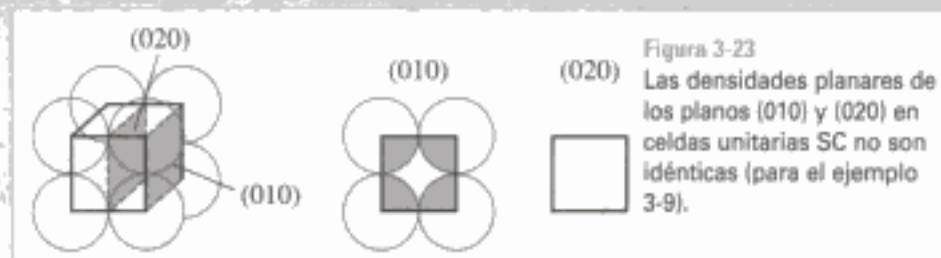


Figura 3-23
Las densidades planares de los planos (010) y (020) en celdas unitarias SC no son idénticas (para el ejemplo 3-9).

$$\begin{aligned}\text{Fracción de empaquetamiento (010)} &= \frac{\text{área de átomos por cara}}{\text{área de la cara}} = \frac{(1 \text{ átomo}) (\pi r^2)}{(a_0)^2} \\ &= \frac{\pi r^2}{(2r)^2} = 0.79\end{aligned}$$

Sin embargo, no hay átomos con centros en los planos (020). Por consiguiente, la densidad planar y la fracción de empaquetamiento planar son cero, ambas. ¡Los planos (010) y (020) no son equivalentes!

Construcción de direcciones y planos Para construir una dirección o un plano en la celda unitaria, tan sólo se procede en reversa. En el ejemplo 3-10 se muestra cómo hacerlo.

EJEMPLO 3-10 Trazado de dirección y plano

Trazar a) la dirección $[1\bar{2}1]$ y b) el plano $(\bar{2}10)$ en una celda unitaria cúbica.

SOLUCIÓN

- Como sabemos que hay que moverse en la dirección negativa, ubiquemos el origen en 0, +1, 0. La "cola" de la dirección estará en este nuevo origen. Se determina un segundo punto de la dirección avanzando +1 en la dirección x , -2 en la dirección y y +1 en la dirección z [Fig. 3-24(a)].
- Para trazar el plano $(\bar{2}10)$, se determinan primero los recíprocos de los índices para obtener las intersecciones:

$$x = \frac{1}{-2} = -\frac{1}{2} \quad y = \frac{1}{1} = 1 \quad z = \frac{1}{0} = \infty$$

Como el cruce con x está en una dirección negativa y se desea trazar el plano dentro de la celda unitaria, se cambia el origen +1 en la dirección x , hasta 1, 0, 0. Entonces se puede ubicar la intersección con x en -1/2 y con y en +1. El plano será paralelo al eje z (Fig. 3-24(b)).

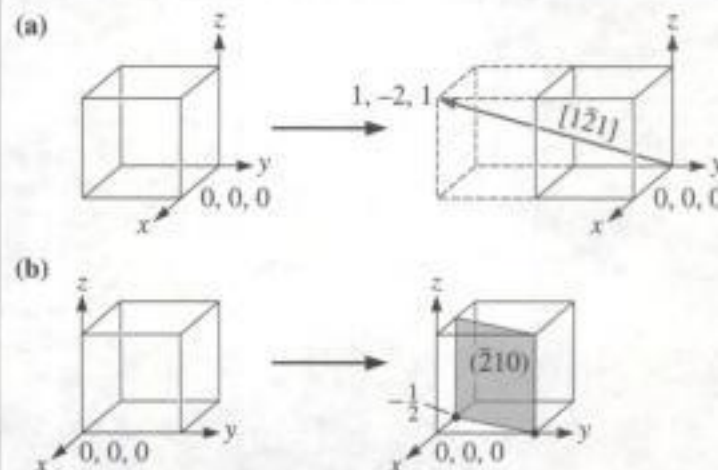


Figura 3-24 Construcción de (a) una dirección y (b) un plano dentro de una celda unitaria (para el ejemplo 3-10).

Índices de Miller para celdas unitarias hexagonales Se ha desarrollado un conjunto especial de **índices de Miller-Bravais** para las celdas unitarias hexagonales, debido a la simetría exclusiva del sistema (Fig. 3-25). En el sistema de coordenadas se usan cuatro ejes en lugar de tres, y el eje a_3 es redundante. El procedimiento para determinar los índices de planos es exactamente igual a los anteriores, pero se requieren cuatro intersecciones y se obtienen índices de la forma $(hkil)$. Debido a la redundancia del eje a_3 y de la geometría especial del sistema, los tres primeros enteros en la designación, que corresponden a las intersecciones a_1 , a_2 y a_3 , se relacionan con $h + k = -i$.

Las direcciones en las celdas HCP se indican con cualquiera de los sistemas de tres o de cuatro ejes. Con el sistema de tres ejes, el procedimiento es igual que para los índices de Miller convencionales; en el ejemplo 3-11 se describe este procedimiento. En el sistema de cuatro ejes se necesita un procedimiento más complicado, mediante el cual la dirección se descompone en cuatro vectores. Se determina la cantidad de parámetros de red que es necesario mover en cada dirección para ir de la "cola" a la "punta" de la misma, y al mismo tiempo se asegura que $h + k = -i$, para tener consistencia. Esto se observa en la figura 3-26, donde se aprecia que la dirección $[010]$ es igual que la dirección $[\bar{1}2\bar{1}0]$.

También se puede convertir la notación con tres ejes en la de cuatro ejes para direcciones, con las siguientes ecuaciones, en las que h' , k' y l' son los índices en el sistema de tres ejes:

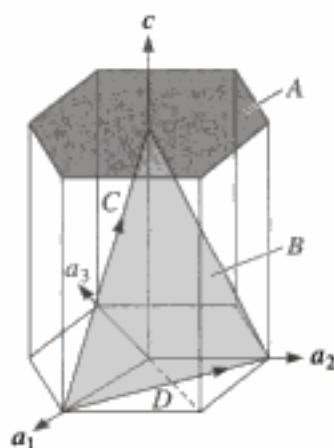


Figura 3-25

En las celdas unitarias HCP se obtienen los índices de Miller-Bravais usando un sistema coordinado de cuatro ejes. Los planos identificados con A y B y las direcciones identificadas con C y D son los del ejemplo 3-11.

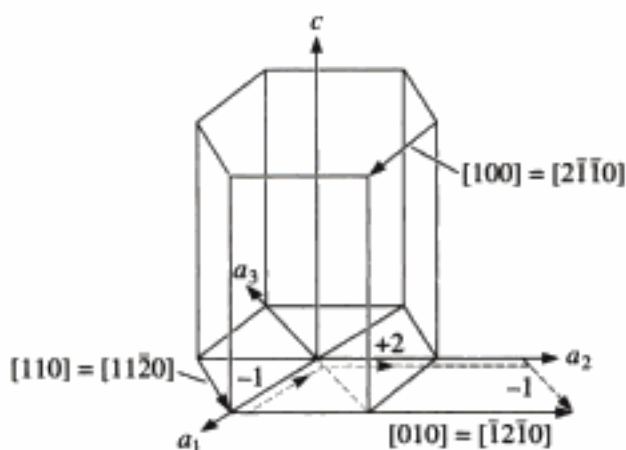


Figura 3-26

Direcciones comunes en la celda unitaria HCP, usando sistemas con tres y cuatro ejes. Las líneas punteadas muestran que la dirección $[\bar{1}2\bar{1}0]$ es equivalente a una dirección $[010]$.

$$\left. \begin{aligned} h &= \frac{1}{3}(2h' - k') \\ h &= \frac{1}{3}(2k' - h') \\ i &= \frac{1}{3}(h' + k') \\ l &= l' \end{aligned} \right\} \quad (3-6)$$

Después de la conversión, podrá necesitarse eliminar las fracciones en h , k , i y l , o reducirlos a los enteros mínimos.

EJEMPLO 3-11

Determinación de los índices de Miller-Bravais para planos y direcciones

Determine los índices de Miller-Bravais para los planos A y B y para las direcciones C y D de la figura 3-25.

SOLUCIÓN

Plano A

1. $a_1 = a_2 = a_3 = \infty$, $c = 1$
2. $\frac{1}{a_1} = \frac{1}{a_2} = \frac{1}{a_3} = 0$, $\frac{1}{c} = 1$
3. No hay fracciones que simplificar.
4. (0001)

Plano B

1. $a_1 = 1$, $a_2 = 1$, $a_3 = -\frac{1}{2}$, $c = 1$
2. $\frac{1}{a_1} = 1$, $\frac{1}{a_2} = 1$, $\frac{1}{a_3} = -2$, $\frac{1}{c} = 1$
3. No hay fracciones que simplificar.
4. (11 $\bar{2}$ 1)

Dirección C

1. Dos puntos son 0, 0, 1 y 1, 0, 0
2. 0, 0, 1 - 1, 0, 0 = -1, 0, 1
3. No hay fracciones que eliminar ni enteros que reducir.
4. [$\bar{1}$ 01] o [$\bar{2}$ 113]

Dirección D

1. Dos puntos son 0, 1, 0 y 1, 0, 0
2. 0, 1, 0 - 1, 0, 0 = -1, 1, 0
3. No hay fracciones que eliminar ni enteros que reducir.
4. [$\bar{1}$ 10] o [$\bar{1}$ 100]

Planos y direcciones compactos Al examinar la relación entre el radio atómico y el parámetro de red, hemos buscado direcciones de empaquetamiento compacto, donde no se pierde el contacto entre los átomos. Ahora ya podemos asignar índices de Miller a estas direcciones de empaquetamiento compacto, como se muestra en tabla 3-5.

También se pueden examinar con más detalle las celdas FCC y HCP para descubrir que hay al menos un conjunto de planos de empaquetamiento compacto en cada una de ellas. En la figura 3-27 se muestran esos planos. Observe que se produce un arreglo hexagonal de átomos en dos dimensiones. Los planos de empaquetamiento compacto son fáciles de encontrar en la celda unitaria HCP; son los planos (0001) y (0002) de la estructura HCP, y se les da el nombre especial de **planos basales**. De hecho, se puede construir una celda unitaria HCP apilando planos de empaquetamiento compacto en la **secuencia de apilamiento** ...ABABAB... (Fig. 3-27). Los átomos en el plano B, que es el plano (0002), entran en los valles intermedios de los átomos del plano A, que es el plano inferior (0001). Si se coloca otro plano con orientación idéntica al plano A en los valles del plano B, se crea la estructura HCP. Observe que todos los planos de empaquetamiento compacto posibles son paralelos entre sí. Sólo los planos basales, (0001) y (0002), tienen empaquetamiento compacto.

En la figura 3-27 se observa el número de coordinación de los átomos en la estructura HCP. El átomo central de un plano basal toca seis átomos en el mismo plano. Ese átomo también toca tres átomos en un plano inferior y tres en un plano superior. El número de coordinación es 12.

En la estructura FCC, los planos de empaquetamiento estrecho tienen la forma {111} (Fig. 3-28). Cuando se apilan planos paralelos (111), los átomos en el plano B entran en los valles del plano A, y los átomos en el plano C entran en los valles de los planos A y B. El cuarto plano ajusta en forma directa sobre átomos en el plano A. En consecuencia, se produce una secuencia de apilamiento ...ABCABCABC... al usar el plano (111). De nuevo, se observa que cada átomo tiene un número de coordinación igual a 12.

A diferencia de la celda unitaria HCP, hay cuatro conjuntos de planos de empaquetamiento compacto no paralelos: (111), ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$), ($1\bar{1}1$) y ($\bar{1}11$), en la celda FCC. Esta diferencia entre

TABLA 3-5 ■ Planos y direcciones compactas

Estructura	Direcciones	Planos
SC	$\langle 100 \rangle$	Ninguno
BCC	$\langle 111 \rangle$	Ninguno
FCC	$\langle 110 \rangle$	{111}
HCP	$\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ o $\langle 11\bar{2}0 \rangle$	(0001), (0002)

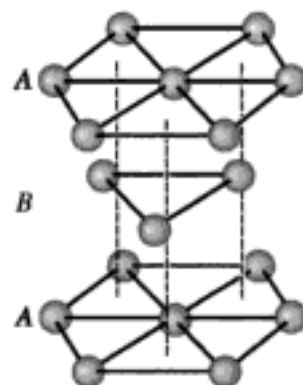


Figura 3-27

La secuencia de apilamiento ABABAB de planos compactos produce la estructura HCP.

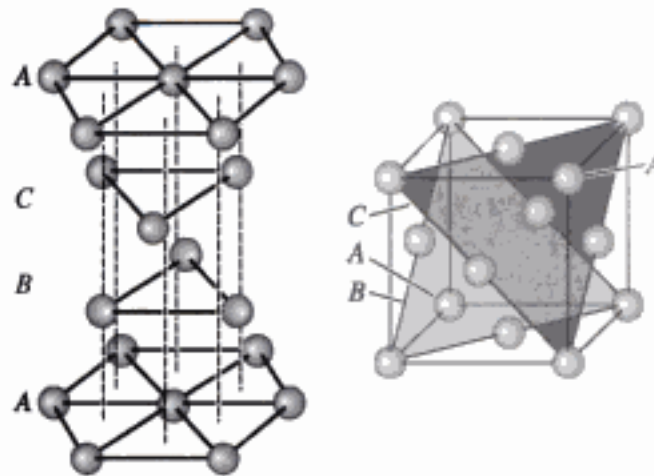


Figura 3-28
La secuencia de apilamiento ABCABC de planos compactos produce la estructura FCC.

las celdas unitarias FCC y HCP, la presencia o ausencia de planos con empaquetamiento compacto, afecta al comportamiento de los metales que tienen esas estructuras.

Comportamiento isotrópico y anisotrópico A causa de las diferencias de arreglo atómico en los planos y direcciones dentro de un cristal, también varían algunas propiedades con la dirección. Un material es cristalográficamente **anisotrópico** si sus propiedades dependen de la dirección cristalográfica en la cual se mide la propiedad. Por ejemplo, el módulo de elasticidad del aluminio es 75.9 GPa (11×10^6 psi) en las direcciones $\langle 111 \rangle$, pero sólo 63.4 GPa (9.2×10^6 psi) en las direcciones $\langle 100 \rangle$. Si las propiedades son idénticas en todas las direcciones, el material es cristalográficamente **isotrópico**. Obsérvese que un material como el aluminio, que es cristalográficamente anisotrópico, se puede comportar como material isotrópico si está en forma policristalina. Esto se debe a las orientaciones aleatorias de los distintos cristales en un material policristalino, que en su mayoría anulan cualquier efecto de la anisotropía como resultado de la estructura cristalina. En general, la mayoría de los materiales policristalinos muestra propiedades isotrópicas. Los materiales que son monocristales, o en los cuales hay muchos granos orientados en ciertas direcciones (obtenidos en forma natural o deliberada), tendrán normalmente propiedades mecánicas, ópticas, magnéticas y dieléctricas anisotrópicas.

Distancia interplanar La distancia entre dos planos paralelos adyacentes de átomos con los mismos índices de Miller se llama **distancia interplanar** (d_{hkl}). Esta distancia, en los materiales cúbicos, se calcula con la siguiente ecuación:

$$d_{hkl} = \frac{a_0}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (3-7)$$

en donde a_0 es el parámetro de red, y h , k y l representan los índices de Miller de los planos adyacentes que se estén considerando. Las distancias interplanares de materiales no cúbicos se calculan con ecuaciones más complejas.[11]

En cualquiera de las estructuras cristalinas que hemos descrito, hay pequeños huecos entre los átomos normales, y en ellos se pueden ubicar átomos más pequeños. A esos lugares se les llama **sitios intersticiales**.

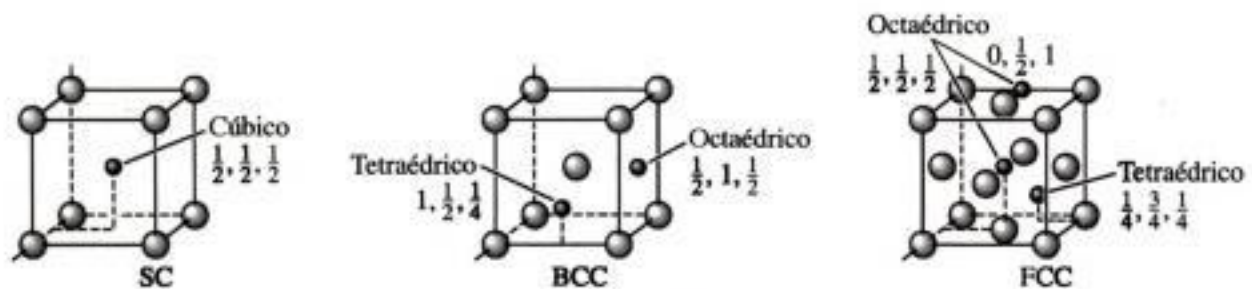


Figura 3-29 Ubicación de los sitios intersticiales en las celdas unitarias cúbicas. Sólo se muestran sitios representativos.

Cuando se coloca un átomo en un sitio intersticial, toca a dos o más átomos de la red. Este átomo intersticial tiene un número de coordinación igual a la cantidad de átomos en contacto con él. La figura 3-29 muestra los lugares intersticiales en las estructuras SC, BCC y FCC. El **sitio cúbico**, con un número de coordinación de ocho, se presenta en la estructura SC. Los **sitios octaédricos** producen un número de coordinación de seis (no ocho). Se llaman sitios octaédricos porque los átomos que tocan al átomo intersticial forma un octaedro y los átomos mayores ocupan los puntos normales de la red. Los **sitios tetraédricos** producen un número de coordinación igual a cuatro. Por ejemplo, los sitios octaédricos en las celdas unitarias BCC están en las caras del cubo; un átomo pequeño colocado en el sitio octaédrico toca los cuatro átomos de los vértices de la cara, un átomo en el centro de la celda unitaria, más otro en el centro de la celda unitaria adyacente, con lo que se obtiene un número de coordinación de seis. En las celdas unitarias FCC, los sitios octaédricos están en el centro de cada arista del cubo y también en el centro de la celda unitaria.

EJEMPLO 3-12 Cálculo de sitios octaédricos

Calcule la cantidad de sitios octaédricos que pertenezcan *en forma exclusiva* a una celda unitaria FCC.

SOLUCIÓN

Los sitios octaédricos incluyen las 12 aristas de la celda unitaria, con las coordenadas

$$\begin{array}{cccc} \frac{1}{2}, 0, 0 & \frac{1}{2}, 1, 0 & \frac{1}{2}, 0, 1 & \frac{1}{2}, 1, 1 \\ 0, \frac{1}{2}, 0 & 1, \frac{1}{2}, 0 & 1, \frac{1}{2}, 1 & 0, \frac{1}{2}, 1 \\ 0, 0, \frac{1}{2} & 1, 0, \frac{1}{2} & 1, 1, \frac{1}{2} & 0, 1, \frac{1}{2} \end{array}$$

más la posición central, $1/2, 1/2, 1/2$. Cada uno de los sitios en la arista de la celda unitaria se comparte entre cuatro celdas unitarias, por lo que sólo $1/4$ de cada sitio pertenece exclusivamente a cada celda unitaria. Entonces, la cantidad de sitios que pertenecen exclusivamente a cada celda es:

$$(12 \text{ aristas}) \left(\frac{1}{4} \text{ por celda}\right) + 1 \text{ en el centro} = 4 \text{ sitios octaédricos.}$$

Los átomos o iones intersticiales cuyos radios son un poco mayores que el del sitio intersticial pueden caber en él, apartando los átomos que los rodean. Sin embargo, los átomos cuyos radios son menores que el radio del hueco no pueden entrar en el sitio intersticial, porque el ion “rebotaría” dentro del sitio. Si el átomo intersticial es demasiado grande, entra de

TABLA 3-6 ■ El número de coordinación y la relación de radios

Número de coordinación	Intersticial	Relación de radios	Representación
2	Lineal	0-0.155	
3	Centro de triángulo	0.155-0.225	
4	Centro de tetraedro	0.225-0.414	
6	Centro de octaedro	0.414-0.732	
8	Centro de cubo	0.732-1.000	

preferencia en un sitio con mayor número de coordinación (tabla 3-6). En consecuencia, un átomo cuyo radio sea entre 0.225 y 0.414 entra en un sitio tetraédrico; si su radio es algo mayor que 0.414, entra a un sitio octaédrico. Cuando los átomos tienen el mismo tamaño, como en los metales puros, la relación de radios es uno y el número de coordinación es 12; éste es el caso de los metales con estructuras FCC y HCP.

Muchos cristales iónicos (sección 3-7) se pueden considerar como generados por empaquetamiento compacto de aniones mayores. Entonces, se puede considerar que los cationes son iones más pequeños que caben en los sitios intersticiales de los aniones compactamente empaquetados. Así, las relaciones de radios que se describen en la tabla 3-6 también se aplican a las relaciones de radios del catión al del anión. El empaquetamiento en los cristales iónicos no es tan compacto como el de los metales FCC o HCP.

EJEMPLO 3-13 *Diseño de una pared absorbente de radiación*

Se desea producir una pared absorbente de radiación formada por 10 000 esferas de plomo, cada una de 3 cm de diámetro, en arreglo cúbico centrado en la cara. Se decide que habrá mejor absorción si se llenan con esferas más pequeñas los sitios intersticiales entre las esferas de 3 cm. Diseñe el tamaño de las esferas de plomo pequeñas y determine cuántas se necesitan.

SOLUCIÓN

Para este diseño, podemos aplicar los conocimientos sobre estructuras cristalinas. Por ejemplo, podremos optar por introducir esferas pequeñas de plomo que quepan exactamente en todos los sitios intersticiales octaédricos entre las esferas de 3 cm. Primero,

podemos calcular el diámetro de los sitios octaédricos entre las esferas de 3 cm de diámetro. La figura 6-30 muestra el arreglo de esferas en un plano que contiene un sitio octaédrico.

$$\text{Longitud de } AB = 2R + 2r = 2R\sqrt{2}$$

$$r = \sqrt{2}R - R = (\sqrt{2} - 1)R$$

$$r/R = 0.414$$

Esto es consistente con la tabla 3-6. Como $r/R = 0.414$, el radio de la esfera pequeña de plomo es

$$r = 0.414 * R = (0.414)(3 \text{ cm}/2) = 0.621 \text{ cm}$$

En el ejemplo 3-12, se observa que hay cuatro sitios octaédricos en el arreglo FCC, que también tiene cuatro puntos de red. Así, se necesita la misma cantidad de esferas pequeñas de plomo que de esferas grandes: 10 000 esferas pequeñas. (Como ejercicio, el lector puede determinar el cambio en el factor de empaquetamiento, debido a las esferas pequeñas; también puede comparar los sitios tetraédricos con los octaédricos.)

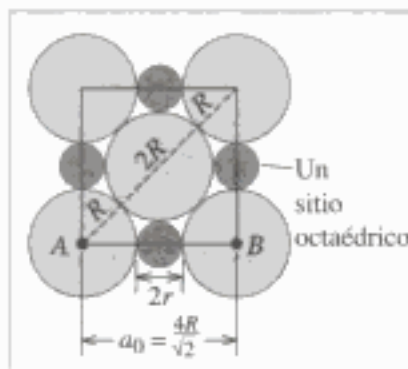


Figura 3-30
Cálculo de un sitio intersticial octaédrico
(para el ejemplo 3-13).

3-7

Estructuras cristalinas de los materiales iónicos

Muchos materiales cerámicos contienen, entre sus aniones y cationes, una fracción considerable de enlaces iónicos. Estos materiales iónicos deben tener estructuras cristalinas que aseguren la neutralidad eléctrica, pero que también permitan el empaquetamiento eficiente de iones de distintos tamaños. Como se mencionó antes, las estructuras cristalinas iónicas se pueden considerar como estructuras de aniones con empaquetamiento compacto. Los aniones forman tetraedros u octaedros y permiten a los cationes entrar en los sitios intersticiales adecuados. En algunos casos, podrá ser más fácil visualizar poliedros de coordinación de cationes con aniones que entran en los sitios intersticiales. Recuerde que en el capítulo 2 se explicó que, con mucha frecuencia, en los materiales reales con aplicaciones en ingeniería, el enlazamiento nunca es 100% iónico. Sin embargo, seguiremos usando esta descripción de la estructura cristalina para describir la de muchos materiales cerámicos. Se deben tener en cuenta los siguientes factores para comprender las estructuras cristalinas de los sólidos con enlaces iónicos.

Radios iónicos Las estructuras cristalinas de los compuestos enlazados iónicamente se pueden describir colocando los aniones en los puntos normales de red de una celda unitaria, y los cationes en uno o más de los sitios intersticiales descritos en la sección 3-6 (o viceversa). La relación de los tamaños de los radios iónicos de aniones y cationes influye tanto sobre la manera

de empaquetamiento como sobre el número de coordinación (tabla 3-6). Obsérvese que los radios de los átomos y los iones son diferentes. Por ejemplo, el radio de un átomo de oxígeno es $0.6 \text{ \AA}$, mientras que el de un anión de oxígeno (O^{2-}) es $1.32 \text{ \AA}$. Esto se debe a que un anión de oxígeno ha adquirido dos electrones más y se ha agrandado. Como regla general, los aniones son mayores que los cationes. Es de esperar que los cationes, al haber adquirido una carga positiva al perder electrones, sean más pequeños. Hablando en el sentido estricto, los radios de cationes y aniones también dependen del número de coordinación.[12,13] Por ejemplo, el radio del ion Al^{3+} es $0.39 \text{ \AA}$ cuando el número de coordinación es cuatro (coordinación tetraédrica). Sin embargo, ese radio es $0.53 \text{ \AA}$ cuando el número de coordinación es seis (coordinación octaédrica). Obsérvese también que el número de coordinación de los cationes es la cantidad de los aniones más cercanos, y viceversa para los aniones. Esto también es cierto en los átomos. Por ejemplo, el radio de un átomo de hierro ¡es diferente en los polimorfos FCC y BCC! Eso indica que los átomos y los iones no son "esferas duras", sino que se pueden deformar. En el apéndice B de este libro se presentan los radios atómicos y iónicos de distintos elementos.

Neutralidad eléctrica Todo el material debe ser eléctricamente neutro. Si las cargas del anión y del catión son idénticas y el número de coordinación de cada ion es idéntico para asegurar un equilibrio correcto de la carga, entonces el compuesto tendrá una fórmula AX (A: catión, X: anión). Por ejemplo, cada catión puede estar rodeado por seis aniones, mientras cada anión, a su vez, está rodeado por seis cationes. Sin embargo, si la valencia del catión es $+2$ y la del anión es -1 , debe haber doble cantidad de aniones, y la fórmula será AX_2 . La estructura del compuesto AX_2 debe asegurar que el número de coordinación del catión sea el doble del número de coordinación del anión. Por ejemplo, cada catión puede tener ocho vecinos inmediatos, mientras que a cada anión sólo lo tocan cuatro cationes.

Conexión entre poliedros de anión Como regla, los poliedros de coordinación (formados por el empaquetamiento compacto de aniones) comparten los vértices y no las caras ni las aristas. Esto se debe a que en poliedros que comparten vértices se reduce en forma considerable la repulsión electrostática entre los cationes, y eso causa la formación de una estructura cristalina más estable. En las siguientes descripciones, se reseñan varias estructuras comunes en los materiales cerámicos. En comparación con las de los metales, las estructuras de los cerámicos son más complicadas. El lector notará también que las constantes de red de los materiales cerámicos tienden a ser mayores que las de los materiales metálicos, porque la repulsión electrostática entre los iones evita un empaquetamiento compacto tanto de aniones como de cationes (Fig. 3-31).

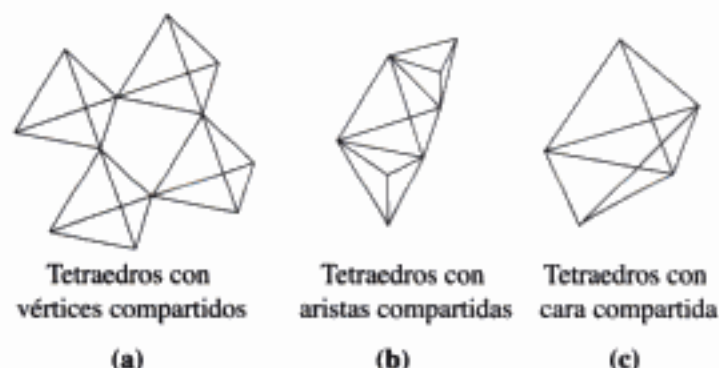


Figura 3-31 Conexión entre poliedros de aniones. Las distintas conexiones posibles incluyen la distribución de vértices, aristas o caras. En esta figura, se muestran ejemplos de conexiones entre tetraedros.

Visualización de estructuras cristalinas en computadoras Antes de comenzar a describir diversas estructuras cristalinas, es importante hacer notar que hay muchos programas y herramientas de cómputo nuevos disponibles. Son muy eficaces para comprender mejor los conceptos de estructura cristalina y otros más que se describirán en el capítulo 4. Un ejemplo de un programa útil es el CaRIne™ (para mayor información consulte el prefacio de este libro).

Estructura del cloruro de cesio El cloruro de cesio, CsCl, tiene estructura cúbica simple, y el sitio intersticial “cúbico” está lleno con el anión Cl [Fig. 3-32(a)]. La relación de radios $r_{\text{Cs}^+}/r_{\text{Cl}^-} = 0.167 \text{ nm}/0.181 \text{ nm} = 0.92$ obliga a que el cloruro de cesio tenga un número de coordinación igual a ocho. La estructura se puede caracterizar como una cúbica simple con dos iones: uno Cs^+ y uno Cl^- , asociados con cada punto de red (o una base de 2). Esta estructura es posible cuando el anión y el catión tienen la misma valencia.

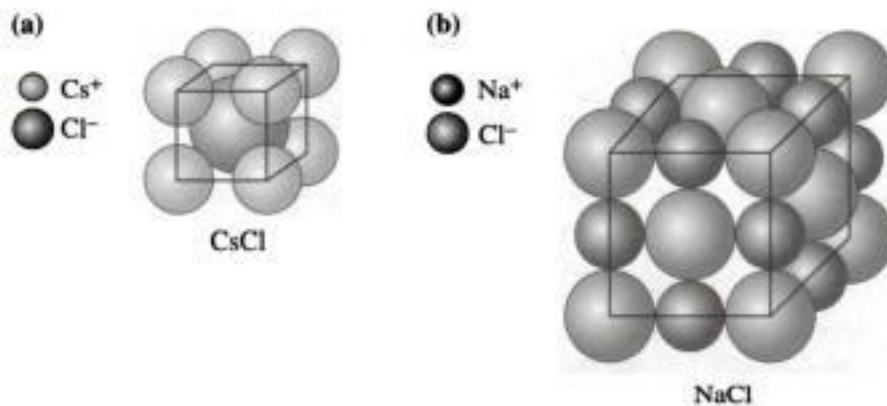


Figura 3-32 (a) La estructura del cloruro de cesio, una celda unitaria SC con dos iones (Cs^+ y Cl^-) por punto de red. (b) La estructura del cloruro de sodio, una celda unitaria FCC con dos iones (Na^+ y Cl^-) por punto de red. Nota: Los tamaños de los iones no están a escala.

EJEMPLO 3-14 Relación de radios del KCl

Para el cloruro de potasio (KCl), a) verificar que el compuesto tiene la estructura del cloruro de cesio y b) calcular el factor de empaquetamiento de este compuesto.

SOLUCIÓN

a) Según el apéndice B, $r_{\text{K}^+} = 0.133 \text{ nm}$, y $r_{\text{Cl}^-} = 0.181 \text{ nm}$; entonces

$$\frac{r_{\text{K}^+}}{r_{\text{Cl}^-}} = \frac{0.133}{0.181} = 0.735$$

Como $0.732 < 0.735 < 1.000$, el número de coordinación de cada clase de ion es 8, y la estructura del CsCl es la más probable.

b) Los iones se tocan a lo largo de la diagonal del cuerpo de la celda unitaria; entonces

$$\sqrt{3}a_0 = 2r_{K^+} + 2r_{Cl^-} = 2(0.133) + 2(0.181) = 0.628 \text{ nm}$$

$$a_0 = 0.363 \text{ nm}$$

$$\begin{aligned} \text{Factor de empaquetamiento} &= \frac{\frac{4}{3}\pi r_{K^+}^3 (1 \text{ ion K}) + \frac{4}{3}\pi r_{Cl^-}^3 (1 \text{ ion Cl})}{a_0^3} \\ &= \frac{\frac{4}{3}\pi(0.133)^3 + \frac{4}{3}\pi(0.181)^3}{(0.363)^3} = 0.725 \end{aligned}$$

Esta estructura se muestra en la figura 3-32(a).

Estructura del cloruro de sodio La relación de radios de los iones sodio y cloruro es $r_{Na^+}/r_{Cl^-} = 0.097/0.181 \text{ nm} = 0.536$; el ion sodio tiene carga +1 y el ion cloro tiene carga -1. Entonces, con base en el equilibrio de cargas y la relación de radios, cada anión y catión debe tener un número de coordinación de seis. La estructura FCC, donde los iones Cl^{-1} están en las posiciones FCC y los Na^{+} en los cuatro sitios octaédricos, satisface estos requisitos [Fig. 3-32(b)]. También se puede considerar que esta estructura es FCC con dos iones, un Na^{+1} y un Cl^{-1} , asociados con cada punto de red. Muchos cerámicos, incluyendo el óxido de magnesio (MgO), el óxido de calcio (CaO) y el óxido ferroso (FeO), tienen esta estructura.

EJEMPLO 3-15

Ilustración de una estructura cristalina y cálculo de su densidad

Demuestre que el MgO tiene la estructura cristalina del cloruro de sodio y calcule la densidad del MgO.

SOLUCIÓN

Del apéndice B, $r_{Mg^{+2}} = 0.066 \text{ nm}$, y $r_{O^{2-}} = 0.132 \text{ nm}$; entonces:

$$\frac{r_{Mg^{+2}}}{r_{O^{2-}}} = \frac{0.066}{0.132} = 0.50$$

Como $0.414 < 0.50 < 0.732$, el número de coordinación de cada ion es seis, y es posible la estructura del cloruro de sodio.

Las masas atómicas son 24.312 y 16 g/mol, respectivamente, del magnesio y del oxígeno. Los iones se tocan a lo largo de la arista del cubo; entonces:

$$\begin{aligned} a_0 &= 2r_{Mg^{+2}} + 2r_{O^{2-}} = 2(0.066) + 2(0.132) = 0.396 \text{ nm} = 3.96 \times 10^{-8} \text{ cm} \\ \rho &= \frac{(4Mg^{+2})(24.312) + (4O^{2-})(16)}{(3.96 \times 10^{-8} \text{ cm})^3 (6.02 \times 10^{23})} = 4.31 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

Estructura de la blenda de zinc Aunque los iones Zn tienen una carga +2 y los iones S tienen carga -2, la blenda de zinc (ZnS) no puede tener la estructura del cloruro de sodio, porque $\frac{r_{Zn^{+2}}}{r_{S^{2-}}} = 0.074 \text{ nm}/0.184 \text{ nm} = 0.402$. Esta relación de radios demanda un número de coordinación cuatro, y eso a su vez significa que los iones sulfuro entran en sitios tetraédricos de una celda unitaria, como se indica en el "cubito" de la celda unitaria (Fig. 3-33). La estructura FCC, con cationes Zn en los puntos de red normales y los aniones S en la mitad de los sitios tetraédricos, puede adaptarse a las restricciones de equilibrio de cargas y de número

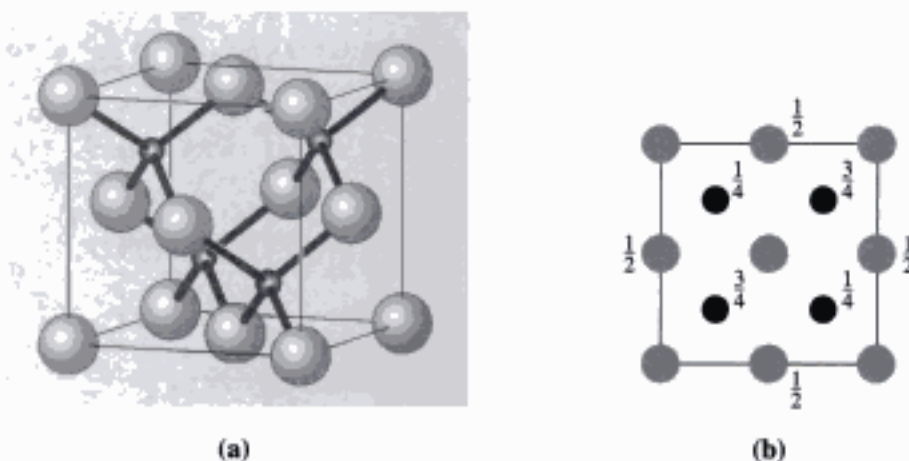


Figura 3-33 (a) La estructura de la blenda de zinc (b) vista de planta.

de coordinación. Hay varios materiales, incluyendo el semiconductor GaAs y muchos otros semiconductores III-V (capítulo 2), que tienen esta estructura.

EJEMPLO 3-16

Cálculo de la densidad teórica del GaAs

La constante de red del arseniuro de galio (GaAs) es $5.65 \text{ \AA}$. Demuestre que la densidad teórica del GaAs es 5.33 g/cm^3 .

SOLUCIÓN

En la celda unitaria de “blenda de zinc” GaAs, hay cuatro átomos de Ga y cuatro de As.

De acuerdo con la tabla periódica (capítulo 2):

Cada mol (6.023×10^{23} átomos) de Ga tiene una masa de 69.7 g . En consecuencia, la masa de cuatro átomos de galio será $(4 \times 69.7 / 6.023 \times 10^{23}) \text{ g}$.

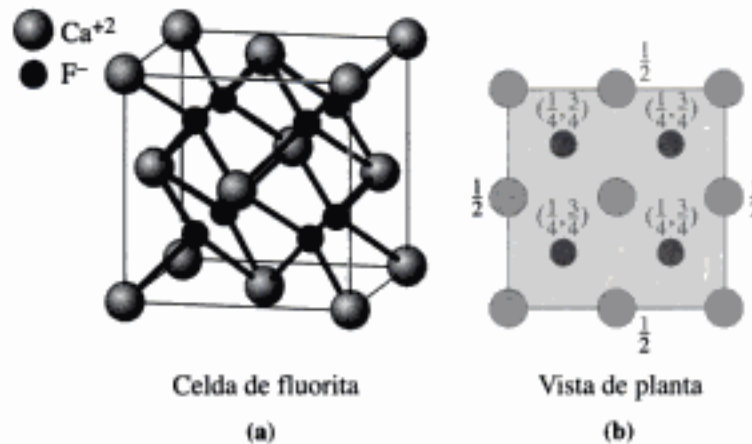
Cada mol (6.023×10^{23} átomos) de As tiene una masa de 74.9 g . En consecuencia, la masa de cuatro átomos de As será $(4 \times 74.9 / 6.023 \times 10^{23}) \text{ g}$.

Estos átomos ocupan un volumen de $(5.65 \times 10^{-8})^3 \text{ cm}^3$.

$$\text{densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} = \frac{4(69.7 + 74.9) / 6.023 \times 10^{23}}{(5.65 \times 10^{-8} \text{ cm})^3} = 5.33 \text{ g/cm}^3$$

Por consiguiente, la densidad teórica del GaAs será 5.33 g/cm^3 .

Estructura de la fluorita La estructura de la fluorita es FCC, con aniones en las ocho posiciones tetraédricas (Fig. 3-34). Así, hay cuatro cationes y ocho aniones por celda, y el compuesto cerámico debe tener la fórmula AX_2 , como en la fluorita de calcio, CaF_2 . En la designación AX_2 , A es el catión y X es el anión. El número de coordinación de los iones calcio es ocho, pero el de los iones fluoruro es cuatro; en consecuencia se asegura un equilibrio de cargas. Uno de los polimorfos del ZrO_2 , llamado circonia cúbica, tiene esta estructura cristalina. Otros compuestos que la tienen son el UO_2 , ThO_2 y CeO_2 .



Estructura de la perovskita Es la estructura cristalina de un mineral llamado perovskita (o perovskita), CaTiO_3 , titanato de calcio. En general, estos compuestos se pueden describir como ABO_3 (Fig. 3-35). En el CaTiO_3 , los aniones oxígeno ocupan los centros de cara de la celda unitaria de perovskita; los vértices, o sitios A, están ocupados por los iones Ca^{+2} , y el sitio octaédrico B en el centro del cubo está ocupado por los iones Ti^{+4} . Con formulaciones basadas en un material llamado titanato de bario (BaTiO_3), se fabrican miles de millones de capacitores para aplicaciones en electrónica. En una de sus formas, este material cerámico tiene la estructura cristalina de la perovskita. Uno de los polimorfos del zirconato titanato de plomo (PZT, por sus siglas en inglés) también tiene esta estructura cristalina. Muchos nuevos superconductores cerámicos, como el óxido de cobre, bario e itrio ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$) y otros, tienen estructuras que se derivan de la de perovskita. En la figura 3-36, se observa un ejemplo de un nuevo superconductor cerámico con base en óxido de cobre, bario e itrio.

Estructura del corindón Es una de las estructuras de la alúmina; se llama alúmina alfa ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$). En la alúmina, los aniones oxígeno se empaquetan en un arreglo hexagonal, y las cationes de aluminio ocupan algunas de las posiciones octaédricas disponibles (Fig. 3-37). Es

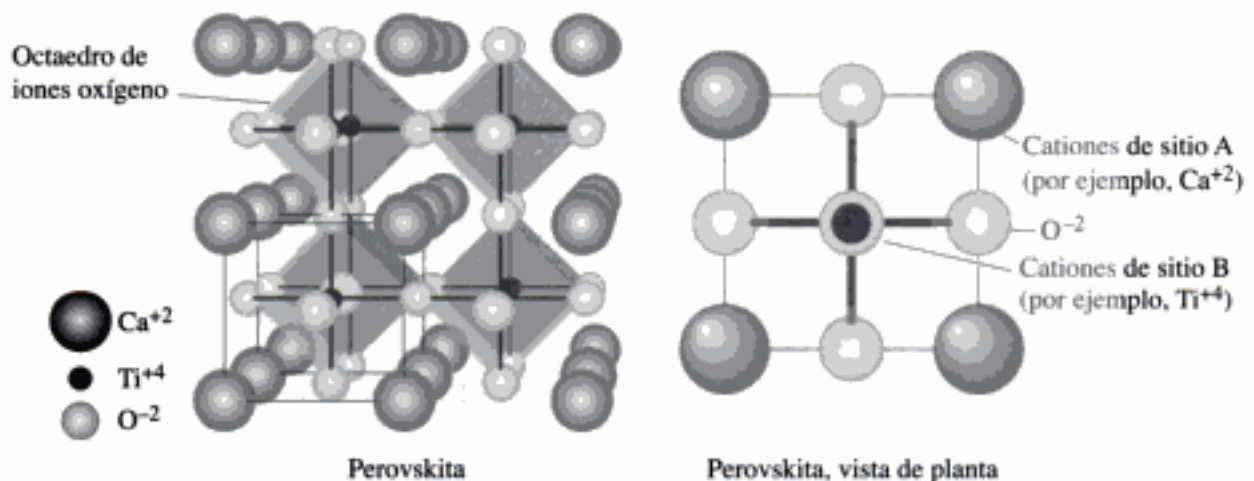


Figura 3-35 Celda unitaria de la perovskita mostrando los cationes en sitio A y B y los iones de oxígeno que ocupan las posiciones de centro de cara de la celda unitaria. Nota: Los iones no se muestran a escala.

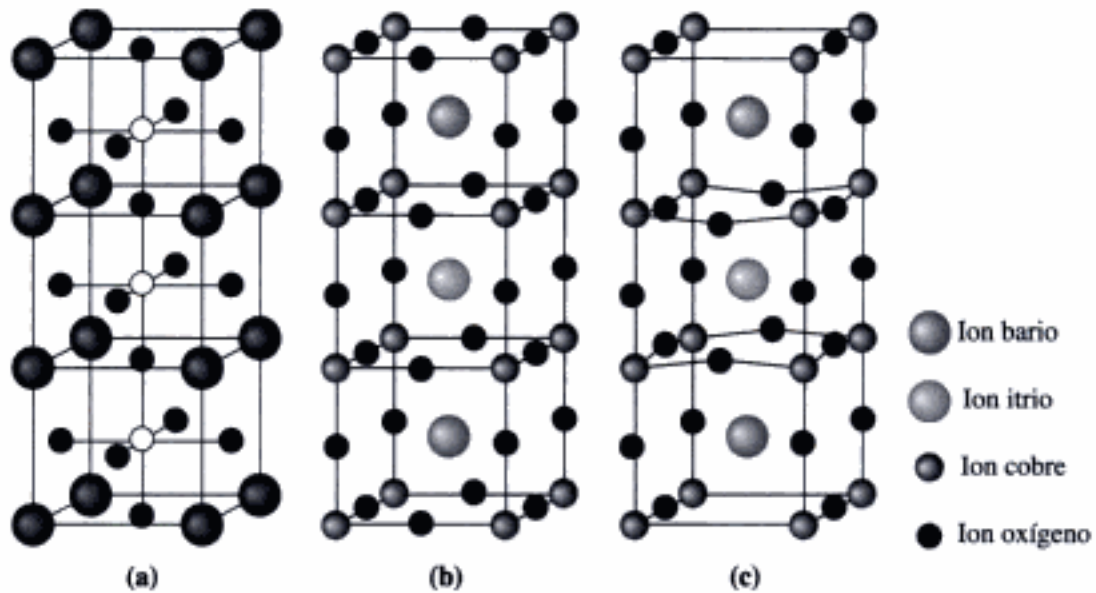


Figura 3-36 Estructura cristalina de un nuevo superconductor cerámico de alta T_c , basado en un óxido de cobre, bario e itrio. Estos materiales son excepcionales por ser cerámicos cuya resistencia eléctrica desaparece a bajas temperaturas. (Fuente: ill.fr/dif/3D-crystals/superconductor.html; © M. Hewat, 1998.)

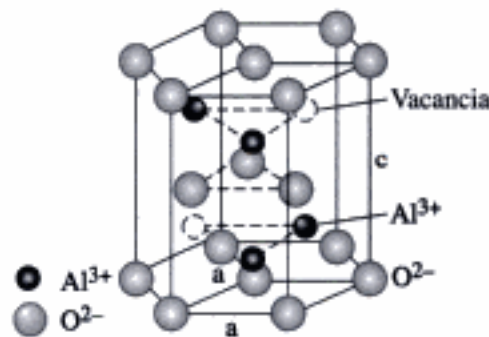


Figura 3-37 Estructura del corindón de alúmina alfa ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}\alpha$).

posible que la alúmina sea el material cerámico de uso más frecuente. Sus aplicaciones comprenden las siguientes, sin limitarse a ellas: bujías de encendido, refractarios, sustratos para empaques electrónicos y abrasivos.

3-8

Estructuras covalentes

Los materiales con enlaces covalentes tienen, con frecuencia, estructuras complicadas para satisfacer las restricciones direccionales que imponen los enlaces.

Estructura cúbica del diamante Los elementos como el silicio (Si), el germanio (Ge), el α -Sn y el carbono (en su forma de diamante) están unidos por cuatro enlaces covalentes que producen un **tetraedro** [Fig. 3-38(a)]. El número de coordinación de cada átomo de silicio es de cuatro, debido a la naturaleza del enlace covalente.

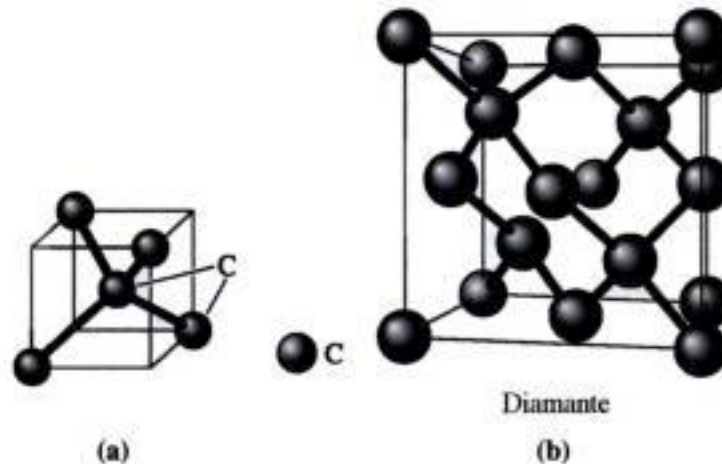


Figura 3-38 (a) Tetraedro y (b) la celda unitaria cúbica del diamante (DC). Se produce esta estructura abierta por los requerimientos del enlace covalente.

Al combinarse esos grupos tetraédricos, se puede formar un cubo grande [Fig. 3-38(b)]. Este cubo grande contiene ocho cubos menores del tamaño del cubo tetraédrico; sin embargo, sólo cuatro de esos cubos contienen tetraedros. El cubo grande es la celda unitaria **cúbica de diamante** (CD). Los átomos de los vértices de los cubos tetraédricos proporcionan los átomos en los puntos normales de la red FCC; sin embargo, dentro de la celda unitaria CD hay cuatro átomos adicionales resultantes de los átomos que están en el centro de los cubos tetraédricos. Se puede describir la estructura cristalina CD como una red FCC con dos átomos asociados a cada punto de red (o una base de 2). En consecuencia, debe haber ocho átomos por celda unitaria.

EJEMPLO 3-17 Determinación del factor de empaquetamiento para el silicio cúbico tipo diamante

Determine el factor de empaquetamiento del silicio cúbico tipo diamante.

SOLUCIÓN

Se observa que los átomos se tocan a lo largo de la diagonal del cuerpo de la celda (Fig. 3-39). Aunque no hay átomos en todos los lugares a lo largo de esa diagonal, hay huecos que tienen el mismo diámetro que los átomos. En consecuencia:

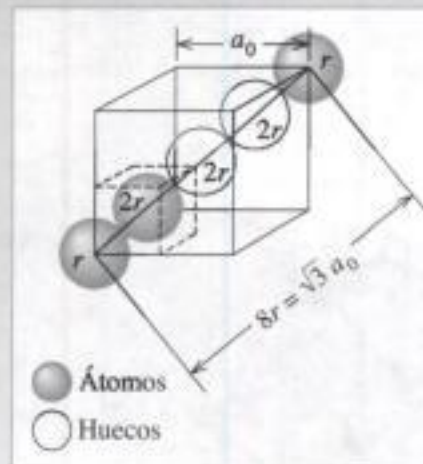


Figura 3-39 Determinación de la relación entre el parámetro de red y el radio atómico en una celda cúbica de diamante (para el ejemplo 3-17).

$$\begin{aligned}\sqrt{3}a_0 &= 8r \\ \text{Factor de empaquetamiento} &= \frac{8 \text{ átomos/celda} \left(\frac{4}{3} \pi r^3\right)}{a_0^3} \\ &= \frac{(8) \left(\frac{4}{3} \pi r^3\right)}{(8r/\sqrt{3})^3} \\ &= 0.34\end{aligned}$$

En comparación con las estructuras de empaquetamiento compacto, ésta es una estructura relativamente abierta. En el capítulo 5 veremos que estos huecos en la estructura son uno de los factores que influyen sobre la rapidez con la que distintos átomos pueden difundirse dentro de un material dado.

EJEMPLO 3-18 Cálculo del radio y la densidad del silicio

La constante de red del Si es 5.43 Å. ¿Cuál será el radio de un átomo de silicio? Calcule la densidad teórica del silicio. La masa atómica del Si es 28.1 g/mol.

SOLUCIÓN

El silicio tiene una estructura cúbica tipo diamante. Como se vio en el ejemplo 3-17, para la estructura cúbica tipo diamante

$$\sqrt{3}a = 8r$$

En consecuencia, al sustituir $a = 5.43$ Å, el radio del silicio es 1.176 Å. Es el mismo radio que se observa en el apéndice B. Para la densidad, se usa el mismo método que en el ejemplo 3-16. Se observa que hay ocho átomos de Si por celda unitaria.

$$\text{densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} = \frac{8(28.1)/6.023 \times 10^{23}}{(5.43 \times 10^{-8} \text{ cm})^3} = 2.33 \text{ g/cm}^3$$

Es el mismo valor de densidad que el del apéndice A.

Silice (o silica) cristalina En varias de sus formas, la sílice (SiO_2) tiene una estructura cristalina cerámica parte covalente y parte iónica. La figura 3-40 muestra la estructura cristalina

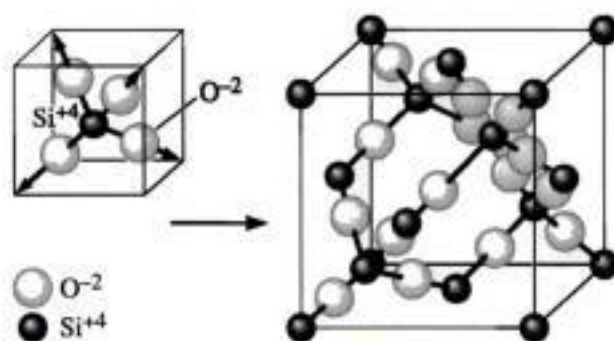


Figura 3-40 Tetraedro silicio-oxígeno y la forma cristobalita β , de sílice resultante.

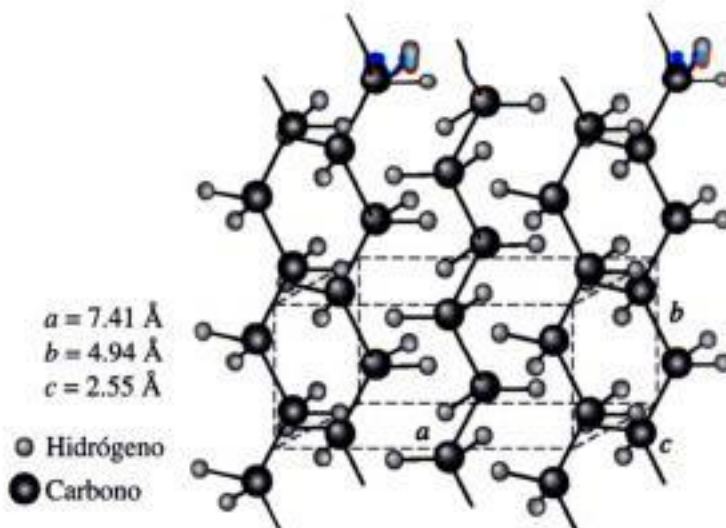


Figura 3-41 Celda unitaria del polietileno cristalino.

de una de las formas de la sílice, la cristobalita β , una base de estructura FCC complicada. Los radios iónicos del silicio y del oxígeno son 0.042 nm y 0.132 nm, respectivamente, por lo que la relación de radios es $r_{\text{Si}^{4+}}/r_{\text{O}^{2-}} = 0.318$, y el número de coordinación es cuatro.

Polímeros cristalinos Varios polímeros pueden formar una estructura cristalina. Las líneas discontinuas de la figura 3-41 representan la celda unitaria para la red del polietileno, que se obtiene uniendo moléculas de C_2H_4 para producir cadenas largas de polímero que forman una celda unitaria ortorrómbica. Algunos polímeros, incluyendo al nailon, pueden tener varias formas polimórficas. La mayoría de los plásticos ingenieriles son en parte amorfos y pueden desarrollar cristalinidad durante su procesamiento. También es posible hacer crecer monocristales de polímeros.

EJEMPLO 3-19

Cálculo de la cantidad de átomos de carbono e hidrógeno en el polietileno cristalino

¿Cuántos átomos de carbono e hidrógeno hay en cada celda unitaria de polietileno cristalino? Hay el doble de átomos de hidrógeno que de carbono en la cadena. La densidad aproximada del polietileno es 0.9972 g/cm^3 .

SOLUCIÓN

Si x es la cantidad de átomos de carbono, entonces $2x$ es la cantidad de átomos de hidrógeno. De acuerdo con los parámetros de red que se muestran en la figura 3-41:

$$\rho = \frac{(x)(12 \text{ g/mol}) + (2x)(1 \text{ g/mol})}{(7.41 \times 10^{-8} \text{ cm})(4.94 \times 10^{-8} \text{ cm})(2.55 \times 10^{-8} \text{ cm})(6.02 \times 10^{23})}$$

$$0.9972 = \frac{14x}{56.2}$$

$$x = 4 \text{ átomos de carbono por celda}$$

$$2x = 8 \text{ átomos de hidrógeno por celda}$$

3-9 Técnicas de difracción para el análisis de la estructura cristalina

La estructura de un material cristalino se puede analizar usando difracción de rayos X o difracción de electrones. Max von Laue (1879-1960) obtuvo el Premio Nobel en 1912 por su descubrimiento relacionado con la difracción de rayos X en un cristal (Fig. 3-42). William Henry Bragg (1862-1942) y su hijo William Lawrence Bragg (1890-1971) ganaron el Premio Nobel en 1915 por sus contribuciones a la difracción de rayos X (Fig. 3-42).

Cuando un haz de rayos X de una longitud de onda específica del mismo orden de magnitud de las distancias interatómicas del material llega a éste, los rayos X se dispersan en todas direcciones. La mayor parte de la radiación dispersada por un átomo anula la radiación dispersada en otros átomos. Sin embargo, los rayos X que llegan a ciertos planos cristalográficos formando ángulos específicos con ellos se refuerzan, en vez de aniquilarse. A este fenómeno se le llama **difracción**. Los rayos X se difractan, o el haz se refuerza, cuando las condiciones satisfacen la **ley de Bragg**.

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{2d_{hkl}} \quad (3-8)$$

en donde el ángulo θ es la mitad del ángulo que forma el haz difractado y el haz original, λ es la longitud de onda de los rayos X y d_{hkl} es la distancia interplanar que produce refuerzo constructivo del haz (véase la Fig. 3-43).

Cuando el material se prepara en forma de un polvo fino, siempre hay al menos algunas partículas de dicho polvo (cristales diminutos o agregados de cristales diminutos) cuyos planos (hkl) están orientados con el ángulo θ adecuado para satisfacer la ley de Bragg. En consecuencia, se produce un haz difractado que forma un ángulo 2θ con el rayo incidente. En un **difractómetro** [Figs. 3-44 y 3-45(a)], un detector móvil de rayos X registra los ángulos 2θ con los cuales se difracta el haz y se obtiene una figura característica de difracción [Fig. 3-45(b)]. Si se conoce la longitud de onda de los rayos X, se pueden determinar las distancias entre planos y, finalmente, la identidad de los planos que causan la difracción. En un difractómetro de rayos X, estos últimos se producen bombardeando un blanco metálico con un haz de electrones de alta energía. Los rayos X emitidos por el cobre tienen una longitud de onda $\lambda \approx 1.54060 \text{ \AA}$ (línea $K\alpha_1$) y por ello se usan.

En el método de Laue, que fue el primero que se usó, el espécimen está en forma de un solo cristal. Se usa un haz de "radiación blanca" formada por rayos X de distintas longitudes de onda. Cada haz difractado tiene distinta longitud de onda. En el método de transmisión de Laue, se coloca una película fotográfica detrás del cristal. En el método de reflexión de Laue, los haces que se difractan hacia atrás se registran en una película entre la fuente y la muestra. A partir de las figuras de difracción registradas, se pueden obtener la orientación y la calidad del monocristal. También es posible determinar la estructura cristalina usando un cristal giratorio y una fuente de rayos X de longitud de onda fija.[11,14]

Normalmente, se puede hacer un análisis de difracción de rayos X en forma bastante rápida (de ~30 minutos a una hora por muestra), en muestras pulverizadas representativas, que no requieren preparación detallada. Esta técnica también se puede usar para determinar si los granos en un material están orientados en una determinada dirección cristalográfica (textura) en materiales volumétricos y en películas delgadas. Normalmente, un técnico bien entrenado puede hacer el análisis e interpretar los datos de difracción en polvos con bastante facilidad. En consecuencia, la difracción de rayos X se usa en muchas industrias como herramienta para fines de control de calidad de sus productos. El análisis de monocristales y materiales que contienen varias fases puede ser más complicado y tardado.

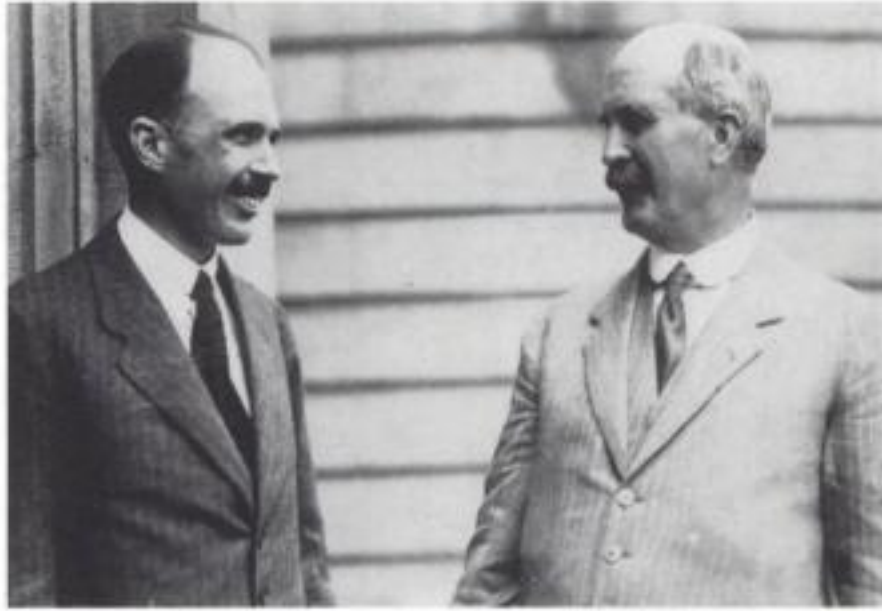


Figura 3-42 Fotografías de William Henry Bragg (arriba, derecha), Lawrence Bragg (arriba, izquierda) y de Max von Laue (abajo). (Imágenes cortesía de la Biblioteca de la Universidad de Pennsylvania.)

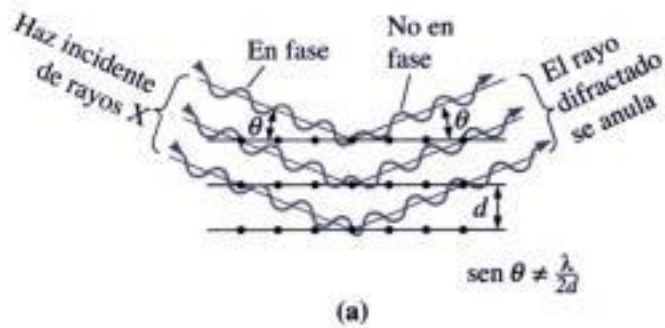


Figura 3-43
Interacciones (a) destructiva y (b) constructiva entre rayos X y el material cristalino. El refuerzo, o interacción constructiva, sucede en ángulos que satisfacen la ley de Bragg.

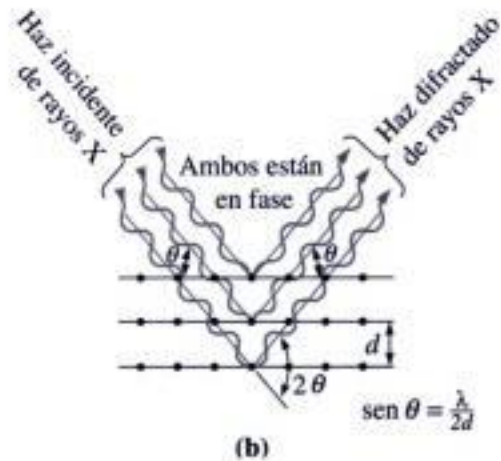


Figura 3-44
Fotografía de un difractómetro de rayos X. (Cortesía de H&M Analytical Services.)

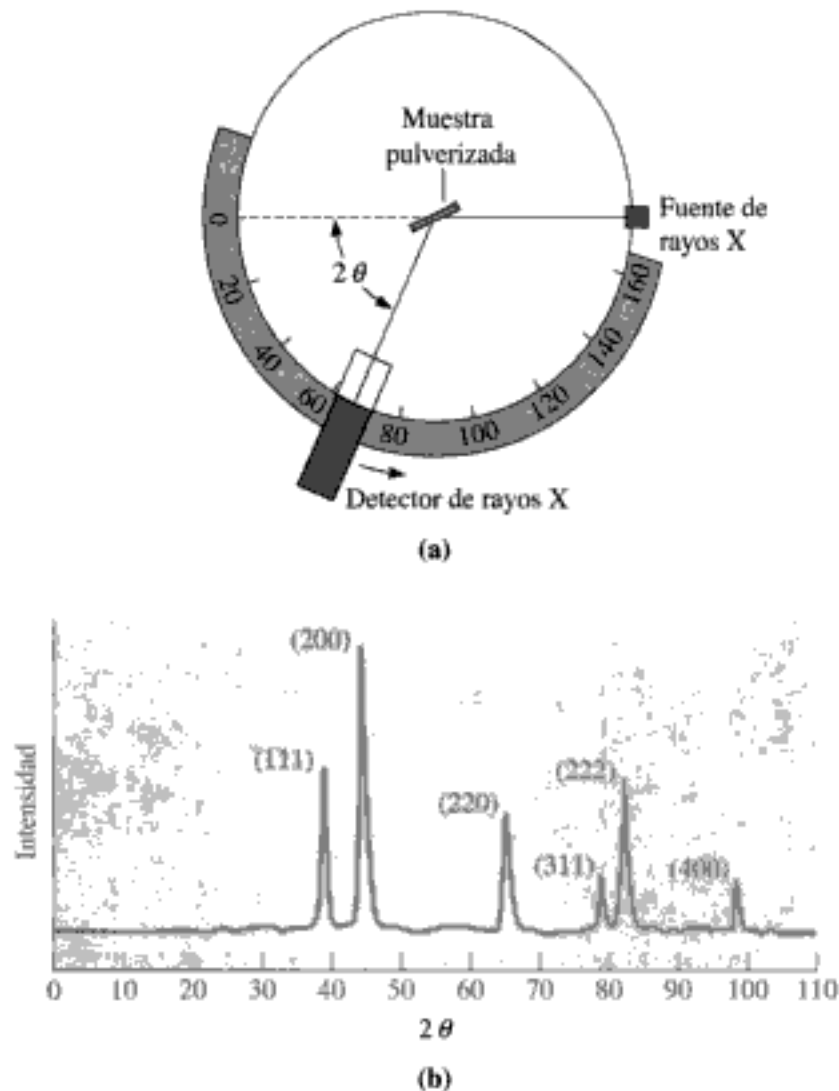


Figura 3-45 (a) Diagrama de un difractómetro, donde se observan la muestra en polvo y los haces incidente y difractado. (b) Figura de difracción obtenida con una muestra de polvo de oro.

Para identificar la estructura cristalina de un material cúbico, se observa la estructura de las líneas difractadas; normalmente se forma una tabla de valores de $\sin^2 \theta$. Al combinar la ecuación 3-7 con la 3-8 del espaciamiento interplanar, se observa que:

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{4a_0^2} (h^2 + k^2 + l^2)$$

En los metales cúbicos simples, todos los planos posibles difractan, produciendo un patrón de $h^2 + k^2 + l^2$ de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, ... En los metales cúbicos centrados en el cuerpo, la difracción sólo sucede en los planos $h^2 + k^2 + l^2$ con suma par de 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, ... Para los metales cúbicos centrados en las caras, se presenta más interferencia destructiva y difractan los planos con suma $h^2 + k^2 + l^2$ igual a 3, 4, 8, 11, 12, 16, ... Si se calculan los valores de $\sin^2 \theta$ y después se determina el patrón adecuado, se puede precisar la estructura de metales que tengan una de estas estructuras, como se observa en el ejemplo 3-20.

EJEMPLO 3-20 *Análisis de la difracción de rayos X*

Los resultados de un experimento de difracción de rayos X de $\lambda = 0.7107 \text{ \AA}$ (radiación que se obtiene con un blanco de molibdeno, Mo) indican que los picos de difracción están en los siguientes ángulos 2θ :

Pico	2θ	Pico	2θ
1	20.20	5	46.19
2	28.72	6	50.90
3	35.36	7	55.28
4	41.07	8	59.42

Determine la estructura cristalina, los índices del plano que produce cada pico y el parámetro de red del material.

SOLUCIÓN

Primero se determina el valor de $\sin^2 \theta$ para cada pico y después se divide entre el valor mínimo, 0.0308.

Pico	2θ	$\sin^2 \theta$	$\sin^2 \theta / 0.0308$	$h^2 + k^2 + l^2$	(hkl)
1	20.20	0.0308	1	2	(110)
2	28.72	0.0615	2	4	(200)
3	35.36	0.0922	3	6	(211)
4	41.07	0.1230	4	8	(220)
5	46.19	0.1539	5	10	(310)
6	50.90	0.1847	6	12	(222)
7	55.28	0.2152	7	14	(321)
8	59.42	0.2456	8	16	(400)

Al hacerlo, se encuentra un patrón de valores de $\sin^2 \theta / 0.0308$ de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8. Si el material fuera cúbico simple, no habría 7, porque ningún plano tendría el valor de 7 para $h^2 + k^2 + l^2$. En consecuencia, el patrón debe ser en realidad 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, ... y el material debe ser cúbico centrado en el cuerpo. Los valores (hkl) de la lista producen los valores requeridos de $h^2 + k^2 + l^2$.

A continuación se podrían usar los valores de 2θ de cualquiera de los picos para calcular la distancia entre planos, y con ella el parámetro de red. Si se escoge el pico 8:

$$2\theta = 59.42 \text{ o } \theta = 29.71$$

$$d_{400} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{0.7107}{2 \sin (29.71)} = 0.71699 \text{ \AA}$$

$$a_0 = d_{400} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} = (0.71699)(4) = 2.868 \text{ \AA}$$

Éste es el parámetro de red del hierro cúbico centrado en el cuerpo.

Difracción y microscopía electrónicas Louis de Broglie había supuesto que los electrones se comportan como ondas. En la difracción de electrones se usan electrones de alta energía (de $\sim 100\,000$ a $400\,000$ eV). Estos electrones se difractan en muestras de materiales transparentes a los electrones. El haz de electrones que sale de la muestra se usa también para formar una imagen de la misma. Es así que la microscopía electrónica de transmisión y la difracción de electrones se usan para obtener imágenes de características microestructurales y para determinar estructuras cristalinas.



Figura 3-46 Fotografía de un microscopio electrónico de transmisión (TEM) para el análisis de la microestructura de los materiales. (Cortesía de JEOL USA, Inc.)

Un electrón de 100 000 eV tiene una longitud de onda aproximada de 0.004 nm! [15] Esta longitud tan ultracorta de los electrones de alta energía permite que un microscopio electrónico de transmisión (TEM, por sus siglas en inglés) produzca en forma simultánea la imagen de la microestructura a una escala muy pequeña. Si la muestra es demasiado gruesa, los electrones no pueden atravesarla, y no se observará una imagen de la figura o un patrón de difracción. En consecuencia, en la microscopía electrónica de transmisión y en la difracción de electrones, se debe preparar la muestra de forma tal que partes de ella sean transparentes a los electrones. En la figura 3-46 se observa un microscopio electrónico de transmisión, y en la figura 3-47 se observa una imagen obtenida en él y un patrón difracción de electrones de una parte de la muestra. Las manchas grandes y brillantes corresponden a los granos de la matriz. Las manchas más pequeñas se originan en cristales de otra fase.

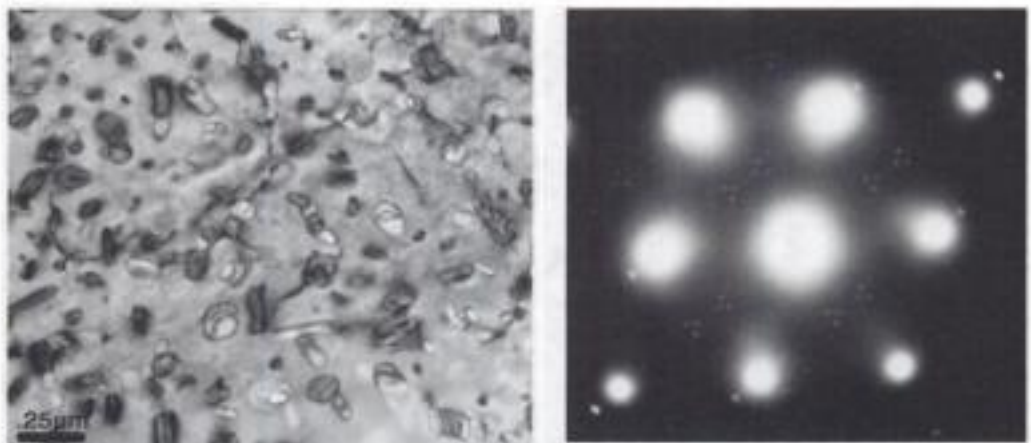


Figura 3-47 Micrografía electrónica de transmisión de una muestra de aleación de aluminio. La figura de difracción de la derecha muestra manchas luminosas grandes que representan la difracción de los principales granos de la matriz de aluminio. Las manchas más pequeñas se originan en cristales de nanoescala de otro compuesto que está presente en esa aleación. (Cortesía del Dr. Jörg M.K. Wiezorek, Universidad de Pittsburgh.)

Otra ventaja del empleo de un TEM es la alta resolución espacial. Al usarlo es posible determinar diferencias entre regiones cristalinas y amorfas, y regiones cristalinas a escalas de longitud muy pequeñas (~ 1 a 10 nm). Esta técnica analítica y sus variaciones —como la microscopía electrónica de alta resolución (HREM, por sus siglas en inglés), la microscopía electrónica de transmisión y barrido (STEM, por sus siglas en inglés), etc.— también se usan para determinar la orientación de los diversos granos y otras propiedades microestructurales que se describirán en capítulos posteriores. Las funciones avanzadas y especializadas asociadas con el TEM también permiten el mapeo químico de los elementos en determinado material. Algunas desventajas del TEM son:

- a) la preparación de muestras que sean casi transparentes al haz de electrones ocupa tiempo;
- b) se requiere mucho tiempo y destreza para analizar los datos obtenidos de una muestra delgada y tridimensional, pero que se representa en una imagen bidimensional y el patrón de difracción;
- c) sólo se examina un volumen muy pequeño de la muestra; y
- d) el equipo es relativamente costoso y requiere mucho cuidado en su uso.

En general, la microscopía electrónica de transmisión se ha vuelto un método de investigación muy usado y aceptado, para analizar propiedades microestructurales a escalas nanométricas.

RESUMEN

- Los átomos o los iones de los materiales sólidos pueden estar arreglados con un orden de corto o de largo alcances.
- Los materiales amorfos, como por ejemplo los vidrios de silicato, vidrios metálicos, silicio amorfo y muchos polímeros, sólo tienen orden de corto alcance. Se forman siempre que la cinética del proceso de fabricación del material no permite que los átomos o los iones ocupen las posiciones de equilibrio. Con frecuencia, estos materiales poseen propiedades muy novedosas y extraordinarias. Muchos materiales amorfos se pueden cristalizar en forma controlada. Esto es la base de la formación de los vitrocerámicos y del reforzamiento de los plásticos PET (politereftalato de etileno) que se usan en la fabricación de botellas.
- Los materiales cristalinos, incluyendo metales y muchos cerámicos, tienen, simultáneamente, orden de corto y de largo alcances. En esos materiales, la periodicidad a largo plazo se describe con la estructura cristalina.
- Los arreglos atómicos o iónicos de los materiales cristalinos se describen con siete sistemas cristalinos generales, que comprenden 14 redes específicas de Bravais. Entre los ejemplos, se encuentran las redes cúbica simple, cúbica centrada en el cuerpo, cúbica centrada en la cara y hexagonal.
- Una red es una colección de puntos organizados de manera única. La base, o elemento recurrente, se refiere a uno o más átomos asociados con cada punto de red. La estructura cristalina se deriva sumando red y base. Aunque sólo hay 14 redes de Bravais, hay cientos de estructuras cristalinas.
- Una estructura cristalina se caracteriza por los parámetros de red de la celda unitaria, que es la subdivisión más pequeña de la estructura cristalina que sigue describiendo la estructura general de la red. Entre otras características, están la cantidad de puntos de red y de átomos por celda unitaria, el número de coordinación (o cantidad de vecinos más cercanos) de los átomos en la celda unitaria y el factor de empaquetamiento de los átomos en la celda unitaria. Estructura cristalina = red + base.

- Los materiales alotrópicos o polimórficos tienen más de una estructura cristalina posible. Las propiedades de los materiales pueden depender sensiblemente de la clase de estructura polimorfa o alotropía de que se trate. Por ejemplo, el titanato de bario tiene propiedades dieléctricas muy diferentes en sus estructuras cúbica y tetragonal.
- Los átomos de los metales que tienen estructura cúbica centrada en la cara (FCC) y hexagonal de empaquetamiento compacto (HCP) están estrechamente unidos; los átomos están dispuestos en una forma que ocupa la máxima fracción del espacio. Las estructuras FCC y HCP alcanzan estos empaquetamientos mediante distintas secuencias de apilamiento de planos atómicos compactos.
- La fracción de empaquetamiento más compacta, con esferas de un solo tamaño, es 0.74, y es independiente del radio de las esferas (es decir, los átomos y los balones de basquetbol se empaquetan con la misma eficiencia, siempre que tengan radio constante).
- Se identifican puntos, direcciones y planos dentro de la estructura cristalina de una manera formal, asignándoles coordenadas e índices de Miller.
- Las propiedades mecánicas, magnéticas, ópticas y dieléctricas pueden ser diferentes al medirlas en distintas direcciones o planos dentro de un cristal; en este caso, se dice que el metal es anisotrópico. Si las propiedades son idénticas en todas direcciones, el cristal es isotrópico. El efecto de la anisotropía cristalográfica se puede enmascarar en un material policristalino por la orientación aleatoria de los granos.
- Los sitios o huecos intersticiales entre los átomos normales en una estructura cristalina se pueden llenar con otros átomos o iones. Se puede explicar la estructura cristalina de muchos materiales cerámicos si se tiene en cuenta la forma en que se ocupan esos sitios. Los átomos o los iones que están en los sitios intersticiales representan un papel importante en el reforzamiento de los materiales, en la afectación de sus propiedades físicas y en el control de su procesamiento.
- Las estructuras cristalinas de muchos materiales iónicos se forman por el empaquetamiento de aniones (por ejemplo, de iones de oxígeno O^{2-}). Los cationes entran en los poliedros de coordinación que forman los aniones. Estos poliedros suelen compartir los vértices, produciendo estructuras cristalinas. Se deben equilibrar las condiciones de neutralidad de carga y de estequiometría. Con estas consideraciones, se pueden explicar las estructuras cristalinas de muchos materiales cerámicos (por ejemplo Al_2O_3 , ZrO_2 , $YBa_2Cu_3O_{7-x}$).
- Las estructuras cristalinas de los materiales con enlace covalente tienden a ser abiertas. Entre los ejemplos están el diamante cúbico (como Si, Ge).
- Aunque la mayoría de los plásticos diseñados tienden a ser amorfos, es posible tener una cristalinidad apreciable en los polímeros y también es posible hacer crecer monocristales de ciertos polímeros.
- La difracción de rayos X y la difracción de electrones se usan para determinar la estructura de los materiales cristalinos. También se puede usar la microscopía electrónica de transmisión para obtener imágenes de propiedades microestructurales en los materiales con niveles de magnitud más pequeños.

GLOSARIO

Allotropía Característica de un elemento de ser capaz de existir en más de una estructura cristalina, dependiendo de la presión y la temperatura. También se llama polimorfismo.

Anisotrópico Que tiene distintas propiedades en distintas direcciones.

Base Grupo de átomos asociados con un punto de red (es igual que elemento recurrente).

Celda unitaria Subdivisión de la red que sigue reteniendo las características generales de toda la red.

Condensado de Bose-Einstein (BEC, por sus siglas en inglés) Estado de la materia recién comprobado experimentalmente, en el que un grupo de átomos ocupa el mismo estado cuántico fundamental.

Conjetura de Kepler Conjetura que hizo Johannes Kepler en 1611, la cual afirma que la fracción de empaquetamiento máxima con esferas de tamaño uniforme no puede ser mayor que $\pi/\sqrt{18}$. Thomas Hales demostró, en 1998, que es cierta.

Cristales líquidos Materiales poliméricos que normalmente son amorfos, pero que pueden transformarse parcialmente en cristales cuando se aplica un campo eléctrico externo. El efecto del campo eléctrico es reversible. Esos materiales se usan en las pantallas de cristal líquido (LCD).

Cristalización Proceso responsable de la formación de cristales; comúnmente en un material amorfo.

Cristalización inducida por esfuerzo Proceso de formación de cristales mediante la aplicación de un esfuerzo externo. Normalmente, de esta manera se puede cristalizar una fracción apreciable de muchos plásticos amorfos, haciéndolos más resistentes.

Cúbica de diamante (DC, por sus siglas en inglés) Estructura especial cúbica centrada en la cara, que presentan el carbono, el silicio y otros materiales con enlaces covalentes.

Defecto Característica microestructural que representa una interrupción del arreglo periódico perfecto de los átomos o iones en un material cristalino. Este término no se usa para indicar la presencia de un defecto de calidad en el material.

Defectos a nivel atómico Defectos tales como vacancias, dislocaciones, etc., que se presentan en una escala de longitud comparable a unas pocas distancias interatómicas.

Densidad Masa de un material por unidad de volumen, normalmente en g/cm^3 .

Densidad lineal Cantidad de puntos de red por unidad de longitud a lo largo de una dirección.

Densidad planar Cantidad de átomos, cuyos centros están en el plano, por unidad de área de ese plano.

Deposición química de vapor (CVD, por sus siglas en inglés) Proceso de producción de películas delgadas o polvos inorgánicos que implica la descomposición de precursores seguida de la reacción química en fase vapor.

Difracción Interferencia o refuerzo constructivo de un haz de rayos X o electrones que interactúa con un material. El rayo difractado proporciona información útil acerca de la estructura del material.

Difracción de electrones Método para determinar el grado de cristalinidad a órdenes de magnitud relativamente pequeña. Se basa en la difracción de electrones, y normalmente se usa un microscopio electrónico de transmisión.

Difracción de rayos X Técnica para analizar materiales cristalinos empleando un haz de rayos X.

Direcciones compactas Direcciones en un cristal a lo largo de las cuales los átomos están en contacto.

Distancia de repetición Distancia de un punto de red al punto de red adyacente, a lo largo de una dirección.

Distancia interplanar Distancia entre dos planos paralelos adyacentes que tienen los mismos índices de Miller.

Estructura compacta Estructura que tiene una fracción de empaquetamiento de 0.74 (FCC y HCP).

Estructura cristalina Arreglo de los átomos de un material en una red regular y repetible.

Factor de empaquetamiento Fracción de espacio que ocupan los átomos en una celda unitaria.

Familia de direcciones Direcciones cristalográficas, todas con las mismas características, aunque su sentido sea diferente. Se indican con este paréntesis $\langle \rangle$.

Familia de planos Planos cristalográficos que tienen todos las mismas características, aunque su orientación sea diferente. Se indican con llaves $\{ \}$.

Fracción de empaquetamiento Fracción de una dirección (fracción de empaquetamiento lineal) o de un plano (fracción de empaquetamiento planar) ocupada realmente por átomos o iones. Cuando un átomo está en cada punto de red, la fracción de empaquetamiento lineal a lo largo de una dirección es el producto de la densidad lineal por el doble del radio atómico.

Grano Cristal pequeño en un material policristalino.

Índices de Miller Notación abreviada para describir ciertas direcciones y planos cristalográficos en un material. Se anotan entre corchetes $[\]$, paréntesis $(\)$, llaves $\{ \}$ o entre $\langle \rangle$; según sea el caso. Un número negativo se representa con una raya arriba del número.

Índices de Miller-Bravais Notación abreviada especial para describir los planos cristalográficos en celdas unitarias hexagonales compactas.

Isotrópico Que tiene las mismas propiedades en todas direcciones.

Ley de Bragg Relación que describe el ángulo con el cual se difracta un haz de rayos X de determinada longitud de onda, en planos cristalográficos con distancia interplanar específica.

Límites de grano Regiones entre granos de un material policristalino.

Material policristalino Material formado por muchos granos.

Materiales amorfos Materiales, incluidos los gases, que no tienen orden de largo alcance o estructura cristalina.

Materiales cristalinos Materiales formados por uno o muchos cristales o granos.

Microscopía electrónica de transmisión (TEM, por sus siglas en inglés) Técnica para obtener imágenes y analizar microestructuras, usando un haz de electrones de alta energía.

Moldeado por soplado y estirado Proceso para producir botellas de plástico.

Motif (elemento recurrente) Grupo de átomos afiliado con un punto de red (es lo mismo que base).

Número de coordinación Cantidad de vecinos más cercanos a un átomo en su arreglo atómico.

Orden de corto alcance Arreglo regular y predecible de los átomos en una distancia corta, por lo general de una o dos distancias entre átomos.

Orden de largo alcance Arreglo regular y repetitivo de átomos en un sólido, que se extiende a una distancia muy grande.

Parámetros de red Longitudes de los lados de la celda unitaria y los ángulos entre esos lados. Los parámetros de red describen el tamaño y la forma de la celda unitaria.

Plano basal Nombre especial que se da al plano de empaquetamiento más compacto en las celdas unitarias hexagonales compactas.

Polimorfismo Compuestos que tienen más de un tipo de estructura cristalina.

Proceso de vidrio flotado Proceso para fabricar grandes piezas de vidrio plano, en el que se hace flotar vidrio fundido sobre un baño de estaño.

Puntos de red Puntos que forman la red. Los alrededores de cada punto de red son idénticos en todo el material.

Radio atómico Radio aparente de un átomo; comúnmente se calcula a partir de las dimensiones de la celda unitaria usando direcciones compactas (empaquetamiento compacto). Depende del número de coordinación.

Red (o retículo) Colección de puntos que dividen al espacio en segmentos menores de igual tamaño.

Redes de Bravais Las catorce redes posibles que se pueden formar con puntos de red.

Secuencia de apilamiento Secuencia en que se apilan los planos compactos. Si la secuencia es *ABABAB*, se produce una celda unitaria hexagonal compacta; si la secuencia es *ABCABCABC*, se produce una estructura cúbica centrada en el cuerpo.

Sistemas cristalinos Arreglos cúbico, tetragonal, ortorrómbico, hexagonal, monoclinico, romboédrico y triclínico, de puntos en el espacio que producen 14 redes de Bravais y cientos de estructuras cristalinas.

Sitio cúbico Posición intersticial cuyo número de coordinación es ocho. Un átomo o ion que en el sitio cúbico toca a otros ocho átomos o iones.

Sitio octaédrico Posición intersticial que tiene número de coordinación seis. Un átomo o ion que en el sitio octaédrico toca a otros seis átomos o iones.

Sitio tetraédrico Posición intersticial que tiene número de coordinación cuatro. En el sitio tetraédrico, un átomo o ion toca a otros cuatro átomos o iones.

Sitios intersticiales Lugares entre los átomos o iones "normales" de un cristal, en los que se coloca otro átomo o ion (por lo general, distinto). Normalmente, el tamaño de este lugar intersticial es menor que el del átomo o ion que se va a introducir.

Solidificación rápida Técnica que se usa para enfriar con mucha rapidez a los metales y aleaciones.

Tetraedro Estructura obtenida cuando los átomos se empaquetan con coordinación cuádruple.

Vidrio metálico Metales o aleaciones amorfos que se obtienen mediante solidificación rápida.

Vidrios Materiales sólidos no cristalinos (normalmente se derivan del estado fundido) que sólo tienen orden atómico de corto alcance.

Vitrocerámicos Familia de materiales que normalmente se derivan de vidrios inorgánicos fundidos y se procesan para formar materiales cristalinos con tamaño de grano muy fino y mejores propiedades mecánicas.

INFORMACIÓN ADICIONAL

1. COLLINGS, P.J. y M. HIRD. *Introduction to Liquid Crystals: Chemistry and Physics*, Taylor y Francis, 1997.
2. BOSE, S., *Z. Phys.* 1924(26), p. 178.
3. EINSTEIN, A. *Sitzber. Kgl. Preuss. Akad. Wiss.*, 1924, p. 261.
4. STOOKEY, DONALD. "Profiles in Ceramics", *American Ceramic Society Bulletin*, 2000.
5. SINKE, W.C. "The Photovoltaic Challenge", *MRS Bulletin*, vol. 18, núm. 10, 1993, p. 18.
6. HALES, T.C. *The Kepler Conjecture*, <http://xxx.lanl.gov/abs/math.MG/9811078>, 1998.
7. MOULSON, A.J. y J.M. HERBERT. *Electroceramics-Materials-Properties-Applications*, Chapman y Hall, 1990.
8. SMART, L. y E. MOORE. *Solid State Chemistry, An Introduction*, Chapman y Hall, 1992.
9. NETTLESHIP, I. *Personal communication*, 2001.
10. STEVENS, R. *Zirconia and Zirconia Ceramics*, 2a. ed., Magnesium Elektron Ltd, 1986.
11. CULLITY, B.D. *Elements of X-Ray Diffraction*, 2a. ed., Addison Wesley, 1978.

12. CHIANG, Y.M., D. BIRNIE y W.D. KINGERY. *Physical Ceramics: Principles for Ceramic Science and Engineering*, Wiley, 1997.
13. KINGERY, W.D., H.K. BOWEN y D.R. UHLMANN. *Introduction to Ceramics*, 2a. ed., Wiley, 1976.
14. JENKINS, R. y R.L. SNYDER. *Introduction to X-ray Powder Diffractometry*, Wiley Interscience, 1996.
15. WILLIAMS, D.B. y C.B. CARTER. *Transmission Electron Microscopy Basics I*, Plenum Press, 1996.

✓ PROBLEMAS

Sección 3-1 Orden de corto alcance y de largo alcance

- 3-1 ¿Qué es un material "cristalino"?
- 3-2 ¿Qué es un monocristal?
- 3-3 Describa dos aplicaciones en las que se use un material monocristalino.
- 3-4 ¿Qué es un material policristalino?
- 3-5 ¿Qué es un material de cristal líquido?
- 3-6 ¿Qué es un material amorfo?
- 3-7 ¿Por qué algunos materiales tienen estructura amorfa?
- 3-8 Describa dos aplicaciones de los vidrios de silicato amorfo.
- 3-9 Describa un ejemplo de un material amorfo que no se derive de la fusión.
- 3-10 Compare y describa las diferencias de los arreglos atómicos en el silicio amorfo y el silicio cristalino.

Sección 3-2 Materiales amorfos: principios y aplicaciones tecnológicas

- 3-11 Las películas extendidas de silicio amorfo se usan para fabricar módulos fotovoltaicos. ¿Cómo se obtiene el silicio amorfo?
- 3-12 Describa dos aplicaciones del silicio amorfo.
- 3-13 Compare y describa las diferencias de los arreglos atómicos en un vidrio de silicato y en la sílice cristalina.
- 3-14 ¿Qué significa el término vitrocerámica?
- 3-15 ¿La vitrocerámica es un material amorfo o cristalino?
- 3-16 Compare en forma breve las propiedades de los vidrios y las vitrocerámicas.
- 3-17 Describa dos aplicaciones de la vitrocerámica.
- 3-18 Haga un esquema del proceso de soplado y estirado para fabricar botellas de PET.

- 3-19 Explique cómo el plástico PET se vuelve más resistente durante el proceso de convertir una preforma en una botella.
- 3-20 ¿Qué es la cristalización inducida por esfuerzo?
- 3-21 ¿Qué es solidificación rápida? ¿Cuál es la aplicación principal de esta técnica?
- 3-22 ¿Por qué los geles se consideran amorfos?

Sección 3-3 Redes, celdas unitarias, bases y estructuras cristalinas

- 3-23 Defina los términos red, celda unitaria, base y estructura cristalina.
- 3-24 Explique por qué no hay red de Bravais tetragonal centrada en las caras.
- 3-25 Calcule en cm el radio atómico de lo siguiente:
 - a) metal BCC con $a_0 = 0.3294$ nm y un átomo por punto de red, y
 - b) metal FCC con $a_0 = 4.0862$ Å y un átomo por punto de red.
- 3-26 Determine la estructura cristalina de lo siguiente:
 - a) un metal con $a_0 = 4.9489$ Å, $r = 1.75$ Å y un átomo por punto de red, y
 - b) un metal con $a_0 = 0.42906$ nm, $r = 0.1858$ nm y un átomo por punto de red.
- 3-27 La densidad del potasio, que tiene estructura BCC y un átomo por punto de red, es 0.855 g/cm³. El peso atómico de potasio es 39.09 g/mol. Calcule
 - a) el parámetro de red y
 - b) el radio atómico del potasio.
- 3-28 La densidad del torio, que tiene estructura FCC y un átomo por punto de red, es 11.72 g/cm³. El peso atómico del torio es 232 g/mol. Calcule

- a) el parámetro de red y
b) el radio atómico del torio.
- 3-29 Un metal tiene estructura cúbica, su densidad es 2.6 g/cm^3 , su peso atómico es 87.62 g/mol y su parámetro de red es $6.0849 \text{ \AA}$. Un átomo se asocia con cada punto de red. Determine la estructura cristalina del metal.
- 3-30 Un metal tiene estructura cúbica, su densidad es 1.892 g/cm^3 , su peso atómico es 132.91 g/mol y su parámetro de red es $6.13 \text{ \AA}$. Un átomo está asociado con cada punto de red. Determine la estructura cristalina de ese metal.
- 3-31 El indio tiene una estructura tetragonal, con $a_0 = 0.32517 \text{ nm}$ y $c_0 = 0.49459 \text{ nm}$. La densidad es 7.286 g/cm^3 y el peso atómico es 114.82 g/mol . ¿Tiene estructura tetragonal simple o tetragonal centrada en el cuerpo?
- 3-32 El bismuto tiene una estructura hexagonal, con $a_0 = 0.4546 \text{ nm}$ y $c_0 = 1.186 \text{ nm}$. Su densidad es 9.808 g/cm^3 y su peso atómico es 208.98 g/mol . Determine
a) el volumen de la celda unitaria y
b) la cantidad de átomos en cada celda unitaria.
- 3-33 El galio tiene una estructura ortorrómbica con $a_0 = 0.45258 \text{ nm}$, $b_0 = 0.45186 \text{ nm}$ y $c_0 = 0.76570 \text{ nm}$; su radio atómico es 0.1218 nm , su densidad es 5.904 g/cm^3 y su peso atómico es 69.72 g/mol . Determine
a) la cantidad de átomos en cada celda unitaria y
b) el factor de empaquetamiento en la celda unitaria.
- 3-34 El berilio tiene una estructura cristalina hexagonal, con $a_0 = 0.22858 \text{ nm}$ y $c_0 = 0.35842 \text{ nm}$. El radio atómico es 0.1143 nm , la densidad es 1.848 g/cm^3 y el peso atómico es 9.01 g/mol . Determine
a) la cantidad de átomos en cada celda unitaria y
b) el factor de empaquetamiento en la celda unitaria.
- 3-35 Un broche (clip) pesa 0.59 g y es de hierro BCC. Calcule
a) la cantidad de celdas unitarias y
b) la cantidad de átomos de hierro en ese broche. (Véanse los datos necesarios en el apéndice A.)
- 3-36 Para envolver alimentos, se usa una lámina de aluminio con un espesor aproximado de 0.001 pulg . Suponga que todas las celdas unitarias del aluminio están arregladas de tal modo que a_0 es perpendicular a la superficie de la hoja. Para un trozo cuadrado de $4 \times 4 \text{ pulg}$, determine
a) la cantidad total de celdas unitarias en ella y
b) el espesor de la hoja en cantidad de celdas unitarias. (Véase el apéndice A.)

Sección 3-4 Transformaciones alotrópicas o polimorfas

- 3-37 ¿Cuál es la diferencia entre un alótropo y un polimorfo?
- 3-38 ¿Cuáles son las diferentes formas polimórficas de la zirconia?
- 3-39 A más de 882°C , el titanio tiene una estructura cristalina BCC con $a = 0.332 \text{ nm}$. Abajo de esta temperatura, su estructura es HCP con $a = 0.2978 \text{ nm}$ y $c = 0.4735 \text{ nm}$. Determine el cambio porcentual de volumen cuando el titanio BCC se transforma en titanio HCP. ¿Tiene lugar una contracción o una expansión?
- 3-40 El Mn- α tiene una estructura cúbica con $a_0 = 0.8931 \text{ nm}$ y su densidad es 7.47 g/cm^3 . El Mn- β tiene una estructura cúbica distinta, con $a_0 = 0.6326 \text{ nm}$ y una densidad de 7.26 g/cm^3 . El peso atómico del manganeso es 54.938 g/mol y su radio atómico es 0.112 nm . Determine el cambio porcentual de volumen que tiene lugar cuando el Mn- α se transforma en Mn- β .
- 3-41 Calcule la densidad teórica de las tres estructuras polimorfas de la zirconia. Las constantes de red de la forma monoclinica son $a = 5.126$, $b = 5.191$ y $c = 5.304 \text{ \AA}$, respectivamente. El ángulo β , de la celda unitaria monoclinica es 98.9° . Las constantes de red de la celda unitaria tetragonal son $a = 5.094$ y $c = 5.304 \text{ \AA}$, respectivamente. La zirconia cúbica tiene una constante de red de $5.124 \text{ \AA}$.
- 3-42 De acuerdo con la información presentada en este capítulo, calcule el cambio de volumen que hay cuando la forma cúbica de la zirconia se transforma en tetragonal.
- 3-43 La zirconia monoclinica no sirve para fabricar sensores de oxígeno u otros dispositivos. Explique por qué.
- 3-44 ¿Qué significa el término zirconia estabilizada?
- 3-45 Describa dos aplicaciones de la cerámica de zirconia estabilizada.
- 3-46 ¿Qué significa el término cerámica con tenacidad aumentada por transformación?
- 3-47 ¿Cuáles son las dos formas alotrópicas del hierro?

Sección 3-5 Puntos, direcciones y planos en la celda unitaria

- 3-48 Explique la importancia de las direcciones cristalográficas, considerando un ejemplo de su aplicación.
- 3-49 ¿Por qué las aleaciones de Fe-Si que se usan en aplicaciones magnéticas tienen "grano orientado"?
- 3-50 ¿Cómo se usa la influencia de la dirección cristalográfica sobre las propiedades magnéticas en los materiales magnéticos para aplicaciones en medios de grabación?

3-51 Determine los índices de Miller para las direcciones en la celda unitaria cúbica de la figura 3-48.

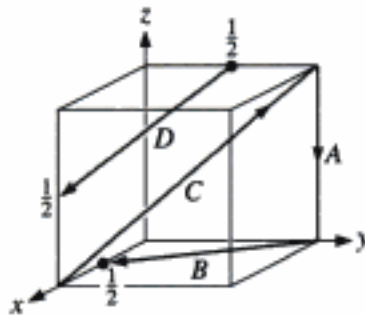


Figura 3-48 Direcciones en una celda unitaria cúbica para el problema 3-51.

3-52 Determine los índices para las direcciones en la celda unitaria de la figura 3-49.

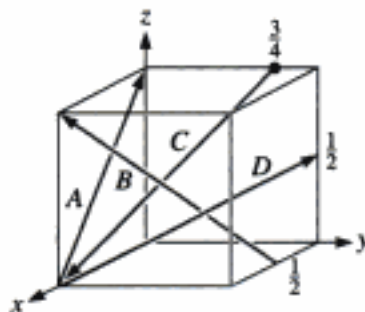


Figura 3-49 Direcciones en una celda unitaria cúbica para el problema 3-52.

3-53 Determine los índices para los planos en la celda unitaria cúbica de la figura 3-50.

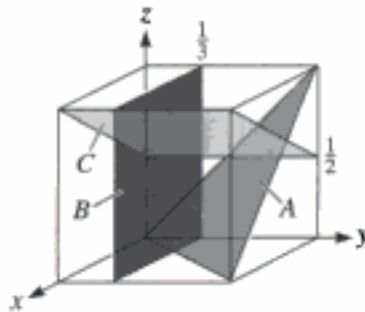


Figura 3-50 Planos en una celda unitaria cúbica para el problema 3-53.

3-54 Determine los índices de los planos en la celda unitaria cúbica de la figura 3-51.

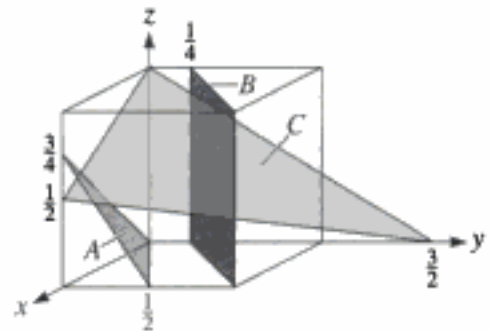


Figura 3-51 Planos en una celda unitaria cúbica para el problema 3-54.

3-55 Determine los índices para las direcciones en la red hexagonal de la figura 3-52, usando los sistemas de tres y cuatro dígitos.

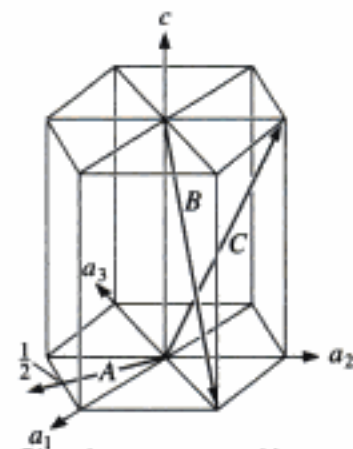


Figura 3-52 Direcciones en una red hexagonal para el problema 3-55.

3-56 Determine los índices para las direcciones en la red hexagonal de la figura 3-53, usando los sistemas de tres y cuatro dígitos.

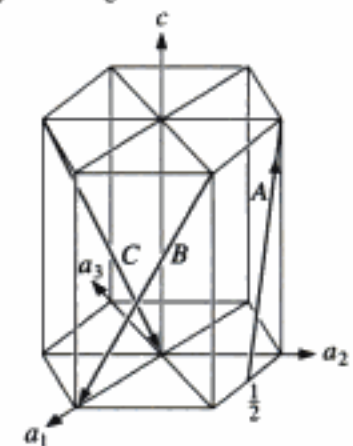


Figura 3-53 Direcciones en una red hexagonal para el problema 3-56.

- 3-57 Determine los índices para los planos en la red hexagonal de la figura 3-54.

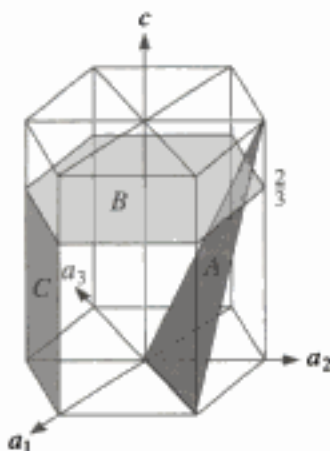


Figura 3-54 Planos en una red hexagonal para el problema 3-57.

- 3-58 Determine los índices para los planos en la red hexagonal de la figura 3-55.

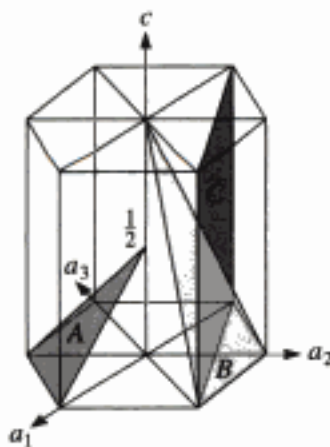


Figura 3-55 Planos en una red hexagonal para el problema 3-58.

- 3-59 Trace los siguientes planos y direcciones dentro de una celda unitaria cúbica:

a) $[101]$ b) $[0\bar{1}0]$ c) $[12\bar{2}]$ d) $[301]$
 e) $[201]$ f) $[2\bar{1}3]$ g) $[0\bar{1}\bar{1}]$ h) (102)
 i) (002) j) $(1\bar{3}0)$ k) $(\bar{2}12)$ l) $(3\bar{1}\bar{2})$

- 3-60 Trace los siguientes planos y direcciones dentro de una celda unitaria cúbica:

a) $[1\bar{1}0]$ b) $(\bar{2}\bar{2}1)$ c) $[410]$ d) $(0\bar{1}2)$
 e) $(\bar{3}21)$ f) $[1\bar{1}1]$ g) $[11\bar{1}]$ h) $[01\bar{1}]$
 i) (030) j) $(\bar{1}21)$ k) $(11\bar{3})$ l) $(0\bar{4}1)$

- 3-61 Trace los siguientes planos y direcciones dentro de una celda unitaria hexagonal:

a) $[01\bar{1}0]$ b) $(11\bar{2}0)$ c) $(\bar{1}011)$
 d) (0003) e) $(\bar{1}010)$ f) $(01\bar{1}1)$

- 3-62 Trace los siguientes planos y direcciones dentro de una celda unitaria hexagonal:

a) $[\bar{2}110]$ b) $(11\bar{2}1)$ c) $(10\bar{1}0)$ d) $(1\bar{2}10)$
 e) $(\bar{1}\bar{1}22)$ f) $(12\bar{3}0)$

- 3-63 ¿Cuáles son los índices de las seis direcciones de la familia $\langle 110 \rangle$ que están en el plano $(11\bar{1})$ de una celda cúbica?

- 3-64 ¿Cuáles son los índices de las cuatro direcciones de la familia $\langle 111 \rangle$ que están en el plano $(\bar{1}01)$ de una celda cúbica?

- 3-65 Determine la cantidad de direcciones de la familia $\langle 110 \rangle$ en una celda unitaria tetragonal y compárela con la cantidad de direcciones de la familia $\langle 110 \rangle$ en una celda unitaria ortorrómbica.

- 3-66 Determine el ángulo entre la dirección $[110]$ y el plano (110) en una celda unitaria tetragonal; después determine el ángulo entre la dirección $[011]$ y el plano (011) en una celda tetragonal. Los parámetros de red son $a_0 = 4.0 \text{ \AA}$ y $c_0 = 5.0 \text{ \AA}$. ¿Qué es lo que causa la diferencia?

- 3-67 Determine los índices de Miller del plano que pasa por los puntos con las siguientes coordenadas:

a) $0, 0, 1$; $1, 0, 0$; y $1/2, 1/2, 0$
 b) $1/2, 0, 1$; $1/2, 0, 0$; y $0, 1, 0$
 c) $1, 0, 0$; $0, 1, 1/2$; y $1, 1/2, 1/4$
 d) $1, 0, 0$; $0, 0, 1/4$; y $1/2, 1, 0$

- 3-68 Determine la distancia de repetición, densidad lineal y fracción de empaquetamiento para el níquel FCC, que tiene un parámetro de red de 0.35167 nm , en las direcciones $[100]$, $[110]$ y $[111]$. ¿Cuál de esas direcciones son compactas?

- 3-69 Determine la distancia de repetición, densidad lineal y fracción de empaquetamiento para el litio BCC, que tiene un parámetro de red de 0.35089 nm , en las direcciones $[100]$, $[110]$ y $[111]$. ¿Cuál de esas direcciones son compactas?

- 3-70 Determine la distancia de repetición, densidad lineal y fracción de empaquetamiento para el magnesio HCP en la dirección $(\bar{2}110)$ y en la dirección $[11\bar{2}0]$. Los parámetros de red del magnesio HCP se encuentran en el apéndice A.

- 3-71 Determine la densidad planar y la fracción de empaquetamiento del níquel FCC en los planos (100) , (110) y (111) . ¿Cuál de esos planos, si es que lo hay, es compacto?

- 3-72 Determine la densidad planar y la fracción de empaquetamiento del litio BCC en los planos (100), (110) y (111). ¿Cuál de esos planos, si es que los hay, es compacto?
- 3-73 Suponga que el rodio FCC se produce en forma de lámina de 1 nm de espesor, con el plano (111) paralelo a la superficie de la hoja. ¿Cuántas distancias interplanares (111), d_{111} , tiene de espesor esa lámina? Vea los datos necesarios en el apéndice A.
- 3-74 En una celda unitaria FCC ¿cuántas d_{111} hay entre el punto 0, 0, 0 y el 1, 1, 1?
- 3-75 ¿Cuáles son las secuencias de apilamiento en las estructuras FCC y HCP?
- 3-76 ¿Qué significa el término material anisotrópico?
- 3-77 Las constantes dieléctricas de un cristal de titanato de bario son bastante distintas a lo largo de las direcciones a y c en la estructura cristalina. ¿Se debe considerar que el cristal de BaTiO_3 es un material isotrópico o anisotrópico?
- 3-78 Explique por qué casi siempre los materiales policristalinos tienen propiedades isotrópicas.
- 3-88 ¿Espera usted que el NiO tenga la estructura del cloruro de cesio, del cloruro de sodio o de la blenda de zinc? De acuerdo con su respuesta, determine
- el parámetro de red,
 - la densidad y
 - el factor de empaquetamiento.
- 3-89 ¿Espera usted que el UO_2 tenga la estructura del cloruro de sodio, de la blenda de zinc o de la fluorita? De acuerdo con su respuesta, determine
- el parámetro de red,
 - la densidad y
 - el factor de empaquetamiento.
- 3-90 ¿Espera usted que el BeO tenga la estructura del cloruro de sodio, de la blenda de zinc o de la fluorita? De acuerdo con su respuesta, determine
- el parámetro de red,
 - la densidad y
 - el factor de empaquetamiento.
- 3-91 ¿Espera usted que el CsBr tenga la estructura del cloruro de sodio, de la blenda de zinc, la fluorita o el cloruro de cesio? De acuerdo con su respuesta, determine
- el parámetro de red,
 - la densidad y
 - el factor de empaquetamiento.

Sección 3-6 Sitios intersticiales

- 3-79 Determine el radio mínimo de un átomo que quepa exactamente en:
- el sitio intersticial tetraédrico en el níquel FCC y
 - el sitio intersticial octaédrico en el litio BCC.
- 3-80 ¿Cuáles son los números de coordinación de los sitios octaédrico y tetraédrico?

Sección 3-7 Estructuras cristalinas de los materiales iónicos

- 3-81 ¿Qué significa poliedros de coordinación?
- 3-82 ¿Es constante el radio de un átomo o un ion? Explique por qué.
- 3-83 Explique por qué se considera que los aniones forman las estructuras de empaquetamiento compacto y los cationes entran en los sitios intersticiales.
- 3-84 ¿Cuál es el número de coordinación del ion titanio en la estructura cristalina de la perovskita?
- 3-85 ¿Cuál es el número de coordinación del Ca^{+2} en la estructura del CaTiO_3 ?
- 3-86 ¿Cuál es el radio de un átomo que cabe exactamente en el sitio octaédrico en el cobre FCC sin perturbar la estructura cristalina?
- 3-87 Use los radios iónicos del apéndice B para determinar el número esperado de coordinación en los siguientes compuestos:

- | | | | |
|---------------------------|------------------|-----------------|----------------------------|
| a) Y_2O_3 | b) UO_2 | c) BaO | d) Si_3N_4 |
| e) GeO_2 | f) MnO | g) MgS | h) KBr |

- 3-92 Trace un esquema del arreglo iónico del plano (110) del ZnS (que tiene la estructura de la blenda de zinc) y compare este arreglo con el del plano (110) del CaF_2 (con la estructura de la fluorita). Compare la fracción de empaquetamiento planar en los planos (110) de estos dos materiales.
- 3-93 El MgO , que tiene la estructura del cloruro de sodio, tiene un parámetro de red de 0.396 nm. Determine la densidad planar y la fracción de empaquetamiento planar para los planos (111) y (222) del MgO . ¿Qué iones hay en cada plano?
- 3-94 Trace un esquema de la estructura cristalina de perovskita del $(\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x})\text{TiO}_3$ (x = fracción mol de Ba^{+2}). *Nota:* La estructura cristalina es igual a la del CaTiO_3 ; sin embargo, hay dos tipos de cationes en el sitio A. Suponga que ocupan aleatoriamente las posiciones en el sitio A.
- 3-95 Trace la estructura cristalina de la estructura polimorfa de la perovskita del $\text{PZT}(\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3)$ (x = fracción mol de Zr^{+4}). Suponga que los dos cationes en el sitio B ocupan aleatoriamente las posiciones en el sitio B.

Sección 3-8 Estructuras covalentes

- 3-96 Calcule la densidad teórica del $\text{Sn-}\alpha$. Suponga la estructura cúbica del diamante y obtenga la información de los radios en el apéndice B.
- 3-97 Calcule la densidad teórica del Ge. Suponga que tiene la estructura cúbica tipo diamante y obtenga la información de los radios en el apéndice B.

- 3-98 ¿Cuáles son las diferentes estructuras polimorfas del carbono?
- 3-99 ¿Por qué las estructuras covalentes son más abiertas que las estructuras cristalinas metálicas o iónicas?
- 3-100 El polipropileno forma una celda unitaria ortorrómbica cuyos parámetros de red son $a_0 = 1.450$ nm, $b_0 = 0.569$ nm y $c_0 = 0.740$ nm. La fórmula química de la molécula del propileno, de donde se obtiene el polímero, es C_3H_6 . La densidad aproximada del polímero es de 0.90 g/cm³. Determine la cantidad de moléculas de propileno, la cantidad de átomos de carbono y la cantidad de átomos de hidrógeno en cada celda unitaria.
- 3-101 La densidad aproximada de la cristobalita es 1.538 g/cm³ y su parámetro de red es 0.8037 nm. Calcule la cantidad de iones SiO_2 , la cantidad de iones de silicio y la cantidad de iones oxígeno en cada celda unitaria.

Sección 3-9 Técnicas de difracción para el análisis de la estructura cristalina

- 3-102 Explique el principio de la difracción de rayos X.
- 3-103 Explique por qué los rayos X deben ser monocromáticos en el método de difracción con polvos.
- 3-104 Explique el principio básico del método de Laue.
- 3-105 Se observa un haz de rayos X difractado de los planos (220) del hierro, con un ángulo 2θ de 99.1° , cuando se usan rayos X de longitud de onda 0.15418 nm. Calcule el parámetro de red del hierro.
- 3-106 Se observa un haz de rayos X difractado de los planos (311) del aluminio, con un ángulo 2θ igual a 78.3° , cuando se usan rayos X de longitud de onda 0.15418 nm. Calcule el parámetro de la red del aluminio.
- 3-107 La figura 3-56 muestra los resultados de un experimento de difracción de rayos X, presentando la intensidad del pico difractado en función del ángulo de difracción 2θ . Si se usaron rayos X de longitud de onda de 0.15418 nm, determine:

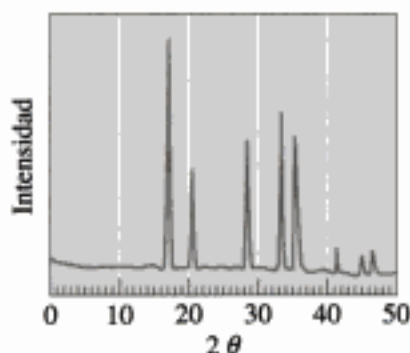


Figura 3-56 Gráfica de difracción de rayos X para el problema 3-107.

gulo de difracción 2θ . Si se usaron rayos X de longitud de onda de 0.15418 nm, determine:

- la estructura cristalina del metal,
 - los índices de los planos que producen cada uno de los picos y
 - el parámetro de la red del metal.
- 3-108 La figura 3-57 muestra los resultados de un experimento de difracción de rayos X, presentando la intensidad del pico difractado en función del ángulo de difracción 2θ . Si se usaron rayos X de 0.07107 nm de longitud de onda, determine:
- la estructura cristalina del metal,
 - los índices de los planos que producen cada uno de los picos y
 - el parámetro de la red del metal.

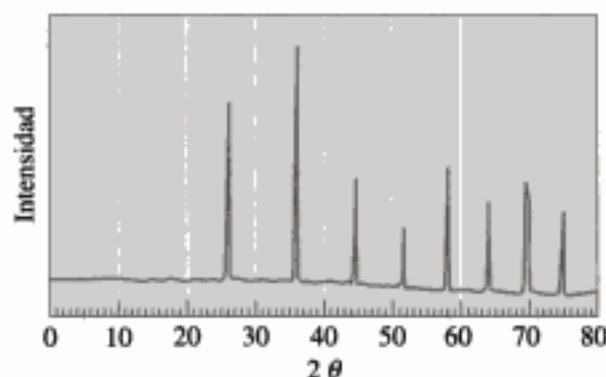


Figura 3-57 Gráfica de difracción de rayos X para el problema 3-108.

- 3-109 Una muestra de zirconia contiene polimorfos cúbico y monoclinico. ¿Cuál será una buena técnica de análisis para detectar la presencia de esos dos polimorfos?
- 3-110 Se cree que una muestra de un material cerámico policristalino tiene algunas fases menores de impurezas. Se hizo un análisis de difracción de rayos X y no indicó que hubiera impurezas. Un cliente importante de la cerámica está convencido de que definitivamente hay alguna(s) fase(s) de impureza presente(s). ¿Cómo puede usted analizar este problema e identificar las fases?
- 3-111 ¿Puede analizarse una muestra de vidrio o de vitrocerámica con difracción de rayos X? Explique por qué.
- 3-112 Un diodo emisor de luz (LED, por sus siglas en inglés) se fabrica depositando una película delgada de AlGaAs sobre una muestra de monocristal de GaAs. ¿Cómo analiza usted la orientación de la película delgada? ¿Cómo analiza usted la orientación del sustrato de monocristal?



Problemas de diseño

- 3-113 Se va a fabricar un sensor de oxígeno para medir el oxígeno disuelto en un recipiente grande con acero fundido. ¿Qué clase de material escogería para esta aplicación? Explique por qué.
- 3-114 Usted desea clasificar especímenes de hierro; algunos de ellos son FCC y otros BCC. Diseñe un método de difracción de rayos X con el que pueda hacer lo anterior.
- 3-115 Desea diseñar un material para fabricar utensilios para cocinar. El material debe ser transparente y resistir el calentamiento y enfriamiento repetidos. ¿Qué clases de materiales podrían usarse para diseñar estos utensilios transparentes y duraderos?
- 3-116 Para fabricar parabrisas y vidrios de ventana, se usa el proceso de vidrio flotado. A veces en esos vidrios aparecen impurezas de NiS, y a esas partículas se les llama "piedras". Las piedras de NiS sufren una transformación de fase a temperatura ambiente. ¿Qué cree que le pasará al vidrio como resultado de un cambio de fase de las piedras de NiS que contiene? (*Sugerencia:* muchas transformaciones de fase se acompañan de cambios de volumen y los vidrios son frágiles.)
- 3-117 Muchos materiales magnéticos tienen comportamiento muy anisotrópico; es decir, las propiedades magnéticas dependen mucho de las direcciones cristalográficas. A esto se le llama anisotropía magnetocristalina. Aunque para algunas aplicaciones es benéfica, hay aplicaciones en las que esa fuerte anisotropía magnetocristalina no es deseable. ¿Cómo diseñaría usted un proceso que obtenga aleaciones metálicas de materiales magnéticos para que virtualmente no haya anisotropía magnetocristalina?



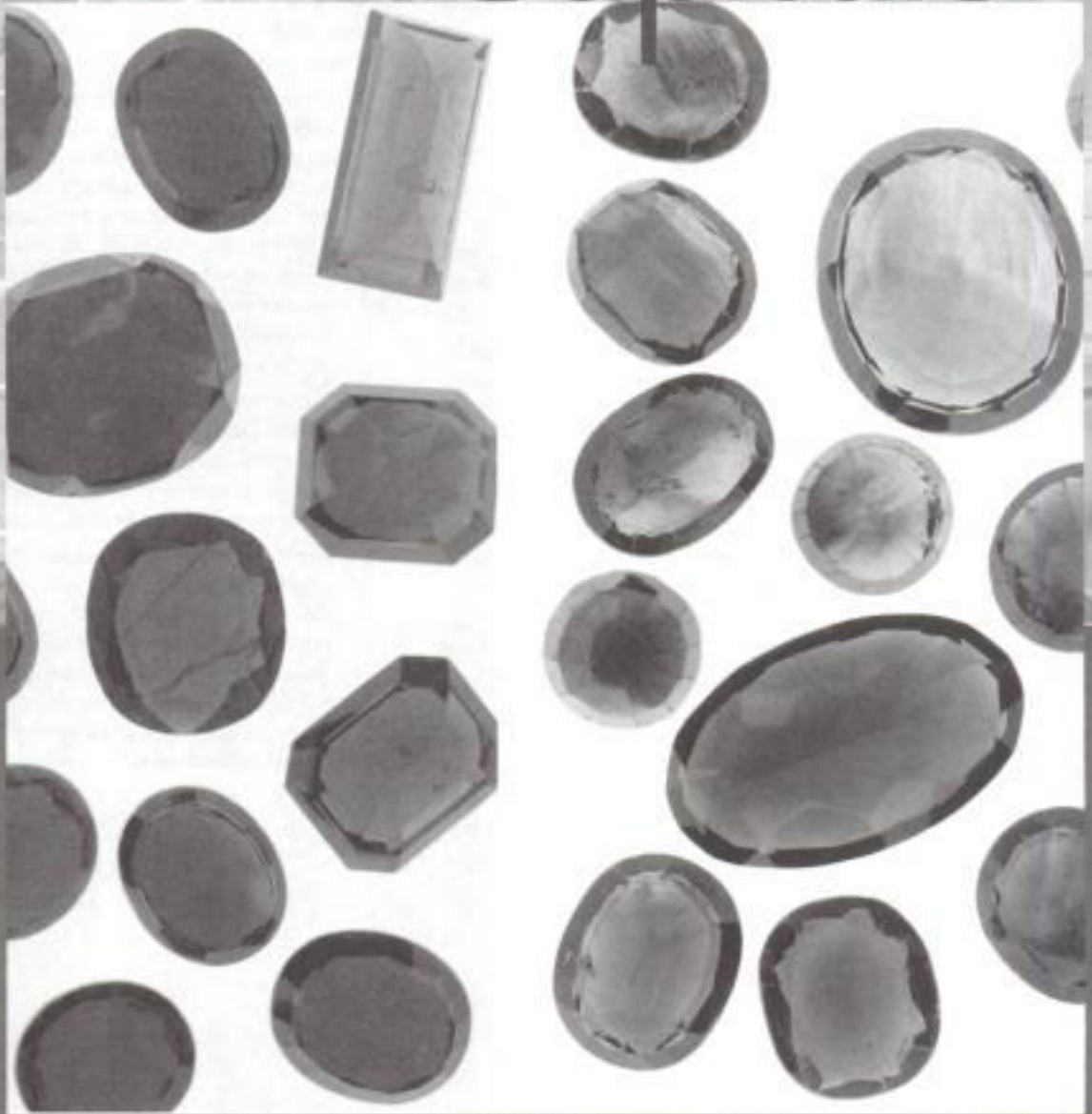
Problemas en computadora

Nota: debe consultar con su profesor el uso de lenguajes de cómputo. En principio, no importa cuál use. Algunas sugerencias son usar C/C++, Fortran o Java. Si no están disponibles para usted, también puede resolver la mayoría de estos problemas usando programas de hoja de cálculo.

- 3-118 La tabla 3-1 contiene fórmulas para calcular el volumen de varias clases de celdas unitarias. Escriba un programa de computadora para calcular el volumen de la celda unitaria en unidades de $\text{\AA}^3$ y nm^3 . Su programa debe pedir al usuario que teclee a) el tipo de celda unitaria, b) las constantes necesarias de red y c) los ángulos. El programa debe reconocer las capturas efectuadas y usar la fórmula adecuada para calcular el volumen de la celda unitaria.
- 3-119 Escriba un programa de computadora que pida al usuario escribir la masa atómica, el radio atómico y la estructura cristalina cúbica de un elemento. El resultado del programa debe ser la fracción de empaquetamiento y la densidad teórica.
- 3-120 Escriba un programa de computadora que pida al usuario escribir el radio de un átomo intersticial y el radio del átomo anfitrión. El programa debe calcular la relación de radios y pronosticar el número de coordinación esperado. Modifique el programa para que trabaje también con sólidos iónicos; es decir, los datos deben ser los radios de cationes y aniones y se debe calcular el número de coordinación esperado para el catión.

By Arkanosant...

Capítulo



¿Qué es lo que hace rojo a un rubí? La adición de más o menos 1% de óxido de cromo en la alúmina crea defectos. Una transición entre esos niveles de defectos hace que una alúmina con óxido de cromo sea un cristal rojo de rubí. De igual modo, la incorporación de Fe^{+2} y Ti^{+4} hace azul al zafiro. (Cortesía de Lawrence Lawry, PhotoDisc/Getty Images.)

Imperfecciones en los arreglos atómicos y iónicos

¿Alguna vez se preguntó...

- ...por qué los cristales de silicio que se usan en la fabricación de obleas de semiconductor que tienen trazas de dopantes como fósforo o boro?
- ...qué hace al acero mucho más duro y resistente que el hierro puro?
- ...qué limita la capacidad de conducción de corriente eléctrica de un superconductor cerámico?
- ...qué hace que un cristal de rubí sea rojo y uno de zafiro sea azul?
- ...por qué se usa cobre de alta pureza como conductor en aplicaciones eléctricas?
- ...por qué los metales FCC (como cobre y aluminio) tienden a ser más dúctiles que los metales BCC y HCP?

El arreglo de los átomos o de los iones en los materiales diseñados tiene imperfecciones o defectos. Con frecuencia, estos defectos tienen un efecto profundo sobre las propiedades de los materiales. En este capítulo, presentaremos los tres tipos básicos de imperfecciones: defectos puntuales, defectos lineales (o dislocaciones) y defectos superficiales. Estas imperfecciones sólo representan defectos en, o desviaciones, respec-

to a los arreglos atómicos perfectos o ideales, en una estructura cristalina dada. El material no se considera defectuoso desde un punto de vista de la aplicación. En muchas aplicaciones es útil la presencia de esos defectos. Sin embargo, hay unas pocas aplicaciones en donde se trata de minimizar determinada clase de defecto. Por ejemplo, los defectos llamados dislocaciones son útiles para aumentar la resistencia de los

metales y las aleaciones; sin embargo, en el silicio monocristalino, que se usa para fabricar *chips* de computadora, no es deseable la presencia de dislocaciones. Con frecuencia, se pueden crear en forma intencional los "defectos" para obtener determinado conjunto de propiedades electrónicas, ópticas y mecánicas. Por ejemplo, el hierro puro es relativamente suave; sin embargo, cuando se le agrega una pequeña cantidad de carbono se crean defectos en el arreglo cristalino del hierro y se convierte en un acero al carbono, que tiene una resistencia bastante mayor. De igual modo, un cristal de alúmina pura es transparente e incoloro, pero cuando se agrega una pequeña cantidad de cromo se crea un defecto especial que produce un bello cristal de rubí rojo. En el procesamiento de los cristales de Si para microelectrónica, se agregan concentraciones muy pequeñas de átomos de P o B al Si. Estas adiciones producen defectos en el arreglo de los átomos del silicio, que imparten propiedades eléctricas especiales a distintas regiones del cristal de silicio. Esto, a su vez, nos permite obtener dispositivos útiles, como los transistores, que son los bloques de construcción básicos que permitieron la revolución de las computadoras y la tecnología de la información. Casi siempre, pequeñas concentraciones de elementos en un metal, por lo demás puro, bajan su conductividad eléctrica. Cuando

se desea usar cobre como conductor en microelectrónica, se usa la máxima pureza posible. Esto se debe a que ¡aun cantidades pequeñas de impurezas causan un aumento de varios órdenes de magnitud en la resistividad del cobre! Por consiguiente, el efecto de los defectos puntuales no siempre es deseable.

Los límites de grano, que son regiones entre distintos granos de un material policristalino, representan una clase de defectos. Los nuevos superconductores cerámicos, bajo ciertas condiciones, pueden conducir la electricidad sin resistencia eléctrica alguna. Los científicos y los ingenieros en materiales han obtenido alambres o cintas largas de esos materiales. También han descubierto que, aunque la corriente pasa con facilidad dentro de los granos de un superconductor policristalino, hay una resistencia apreciable al flujo de la corriente de un grano al otro, a través del límite de grano.[1] Por otra parte, la presencia de límites de grano ayuda en realidad a endurecer los materiales metálicos. En capítulos posteriores, mostraremos cómo se pueden controlar las concentraciones de esos defectos, adaptando la composición o las técnicas de procesamiento. En este capítulo, investigaremos la naturaleza y los efectos de diversos tipos de defectos.

41

Defectos puntuales

Los **defectos puntuales** son interrupciones localizadas en arreglos atómicos o iónicos que, si no fuera por ellos, serían perfectos en una estructura cristalina. Aun cuando se les llama defectos puntuales, la alteración afecta una región donde intervienen varios átomos o iones. Estas imperfecciones se muestran en la figura 4-1 y se pueden introducir por el movimiento de los átomos o los iones al aumentar la energía por calentamiento, durante el procesamiento del material, por introducción de impurezas o por dopado. En el caso normal, las **impurezas** son elementos o compuestos presentes en las materias primas o en el procesamiento. Por ejemplo, los cristales de silicio que crecen en crisoles de cuarzo contienen oxígeno como impureza. Por otra parte, los **dopantes** son elementos o compuestos que se agregan en forma deliberada y en concentraciones conocidas, en lugares específicos de la microestructura, buscando un efecto benéfico sobre las propiedades o el procesamiento. En general, el efecto de las impurezas en las propiedades de los materiales es nocivo, mientras que el de los dopantes es útil. El fósforo (P) y el boro (B) son ejemplos de dopantes que se agregan a cristales de silicio para mejorar las propiedades eléctricas del silicio puro (Si).

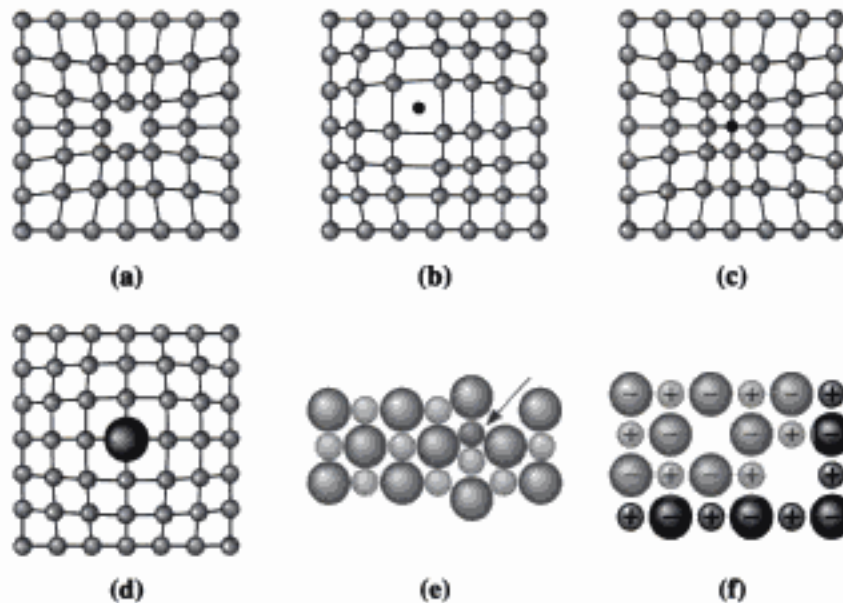


Figura 4-1 Defectos puntuales: (a) vacancia, (b) átomo intersticial, (c) átomo de sustitución pequeño, (d) átomo de sustitución grande, (e) defecto de Frenkel y (f) defecto de Schottky. Todos esos defectos perturban el arreglo perfecto de los átomos que los rodean.

Un defecto puntual implica en general a uno o un par de átomos o iones y, en consecuencia, es distinto de los **defectos extendidos**, como dislocaciones, límites de grano, etc. Un “punto” importante acerca de los defectos es que, aunque se presentan en uno o dos sitios, su presencia es “sentida” en distancias mucho mayores en el material cristalino.

Vacancias Una **vacancia** se produce cuando falta un átomo o un ion en su sitio normal de la estructura cristalina, como en la figura 4-1(a). Cuando faltan átomos o iones (es decir, cuando hay vacancias), aumenta el desorden normal o entropía del material, lo cual aumenta la estabilidad termodinámica de un material cristalino. Todos los materiales cristalinos tienen defectos de vacancia. Las vacancias se introducen a los metales y aleaciones durante la solidificación, a temperaturas elevadas o como consecuencia de daños por radiación. Las vacancias desempeñan un papel importante en la determinación de la rapidez con que se pueden mover los átomos o los iones, es decir, difundirse, en un material sólido, en especial en los metales puros. En el capítulo 5, veremos esto con mayor detalle.

En los materiales cerámicos también pueden aparecer vacancias durante su procesamiento. Por ejemplo, las cerámicas de titanato de bario (BaTiO_3) se usan para fabricar capacitores de cerámica. El proceso de fabricación de los capacitores es un tratamiento térmico llamado **sinterizado** ($\sim 1300^\circ\text{C}$). El sinterizado es el proceso mediante el cual se forma una masa densa calentando materiales pulverizados compactados. El proceso puede significar la formación de un líquido. Normalmente, este tratamiento térmico para el BaTiO_3 se efectúa en el aire. Si se hace en una atmósfera reductora o inerte (por ejemplo, de hidrógeno o nitrógeno), algunos de los iones oxígeno del BaTiO_3 dejarán el material en forma de oxígeno gaseoso. Esto causará la formación de vacancias de ion oxígeno. La formación de vacancias de ion oxígeno causará a su vez otros cambios en el BaTiO_3 , por ejemplo, convertirlo en un semiconductor. ¡Esto no es bueno si estamos fabricando capacitores para almacenar carga eléctrica! En algunos casos, se pueden introducir vacancias en determinados sitios iónicos para aumentar el movimiento de los iones en los materiales cerámicos, lo que puede contribuir a la sinterización a menores temperaturas. En otras aplicaciones más, se usan las vacancias creadas en un material cerámico para afinar sus propiedades eléctricas. Esto se hace en muchas cerámicas que se usan como óxidos conductores y transparentes, como el óxido de indio y estaño (ITO, *indium tin oxide*) y en los sensores de zirconia para oxígeno.

A la temperatura ambiente (~ 298 K), la concentración de vacancias es pequeña, pero aumenta en forma exponencial al aumentar la temperatura, con el siguiente comportamiento tipo Arrhenius:

$$n_v = n \exp\left(\frac{-Q_v}{RT}\right) \quad (4-1)$$

en donde:

n_v es la cantidad de vacancias por cm^3 ;

n es la cantidad de átomos por cm^3 ;

Q_v es la energía necesaria para producir un mol de vacancias, en cal/mol o en joules/mol;

R es la constante de los gases: $1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ u $8.31 \frac{\text{joules}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$; y

T es la temperatura, en grados Kelvin.

Debido a la gran energía térmica que hay cerca de la temperatura de fusión, puede haber hasta una vacancia por 1000 átomos. Obsérvese que esta ecuación calcula la concentración de equilibrio de vacancias a determinada temperatura. También es posible conservar una alta concentración de vacancias producidas en alta temperatura, templando el material con rapidez. Así, en muchos casos, la concentración de vacancias que se observa a temperatura ambiente no es la concentración de equilibrio determinada con la ecuación 4-1.

EJEMPLO 4-1 Efecto de la temperatura sobre las concentraciones de vacancias

Calcule la concentración de vacancias en cobre a temperatura ambiente (25°C). ¿A qué temperatura será necesario calentar el cobre para que la concentración de vacancias obtenida sea 1000 veces mayor que la concentración a temperatura ambiente? Suponga que se requieren 20000 cal para producir un mol de vacancias en el cobre.

SOLUCIÓN

El parámetro de red del cobre FCC es 0.36151 nm. La base es 1 y, en consecuencia, la cantidad de átomos de cobre, o puntos de red, por cm^3 es:

$$n = \frac{4 \text{ átomos/celda}}{(3.6151 \times 10^{-8} \text{ cm})^3} = 8.47 \times 10^{22} \text{ átomos de cobre/cm}^3.$$

A temperatura ambiente, $T = 25 + 273 = 298$ K:

$$\begin{aligned} n_v &= n \exp\left(\frac{-Q_v}{RT}\right) \\ &= \left(8.47 \times 10^{22} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3}\right) \cdot \exp\left(\frac{-20000 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}}{1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \times 298 \text{ K}}\right) \\ &= 1.815 \times 10^8 \text{ vacancias/cm}^3 \end{aligned}$$

Deseamos calcular una temperatura de tratamiento térmico que produzca una concentración de vacancias 1000 veces mayor que este número; es decir, $n_v = 1.815 \times 10^{11}$ vacancias/ cm^3 .

Podemos hacerlo calentando el cobre a una temperatura a la cual se forme esa cantidad de vacancias:

$$\begin{aligned}
 n_v &= 1.815 \times 10^{11} = n \exp\left(\frac{-Q_v}{RT}\right) \\
 &= (8.47 \times 10^{22}) \exp(-20000/(1.987 \times T)) \\
 \exp\left(\frac{-20000}{1.987 \times T}\right) &= \frac{1.815 \times 10^{11}}{8.47 \times 10^{22}} = 0.214 \times 10^{-11} \\
 \frac{-20000}{1.987T} &= \ln(0.214 \times 10^{-11}) = -26.87 \\
 T &= \frac{20000}{(1.987)(26.87)} = 375 \text{ K} = 102^\circ \text{C}
 \end{aligned}$$

Si se calienta el cobre a un poco más de 100°C hasta que se alcance el equilibrio, para después enfriarlo con rapidez a temperatura ambiente, la cantidad de vacancias atrapada en la estructura puede ser mil veces mayor que la cantidad de equilibrio de vacancias a temperatura ambiente. Así, las concentraciones de vacancias encontradas en los materiales están determinadas con frecuencia tanto por factores termodinámicos como cinéticos.

EJEMPLO 4-2

Concentraciones de vacancias en el hierro

Determine la cantidad necesaria de vacancias para que un cristal de hierro BCC tenga una densidad de 7.87 g/cm^3 . El parámetro de red del hierro es $2.866 \times 10^{-8} \text{ cm}$.

SOLUCIÓN

La densidad teórica esperada del hierro se puede calcular a partir del parámetro de red y de la masa atómica. Como el hierro es BCC, en cada celda unitaria hay dos átomos de hierro.

$$\rho = \frac{(2 \text{ átomos/celda})(55.847 \text{ g/mol})}{(2.866 \times 10^{-8} \text{ cm})^3 (6.02 \times 10^{23} \text{ átomos/mol})} = 7.8814 \text{ g/cm}^3$$

Deseamos producir hierro con menor densidad. Podríamos hacerlo introduciendo intencionalmente vacancias en el cristal. Calcularemos la cantidad de átomos de hierro y vacancias que habría en cada celda unitaria para la densidad requerida de 7.87 g/cm^3 :

$$\begin{aligned}
 \rho &= \frac{(X \text{ átomos/celda})(55.847 \text{ g/mol})}{(2.866 \times 10^{-8} \text{ cm})^3 (6.02 \times 10^{23} \text{ átomos/mol})} = 7.87 \text{ g/cm}^3 \\
 X \text{ átomos/celda} &= \frac{(7.87)(2.866 \times 10^{-8})^3 (6.02 \times 10^{23})}{55.847} = 1.9971
 \end{aligned}$$

Es decir, habría $2.00 - 1.9971 = 0.0029$ vacancias por celda unitaria. La cantidad de vacancias por cm^3 es:

$$\text{Vacancias/cm}^3 = \frac{0.0029 \text{ vacancias/celda}}{(2.866 \times 10^{-8} \text{ cm})^3} = 1.23 \times 10^{20}$$

Si tuviéramos información adicional, como la energía necesaria para producir una vacancia en el hierro, podríamos diseñar un tratamiento térmico, como hicimos en el ejemplo 4-1, para producir esta concentración de vacancias.

Defectos intersticiales Un **defecto intersticial** se forma cuando se inserta un átomo o ion adicional en la estructura cristalina en una posición normalmente desocupada, como en la figura 4-1(b). Los sitios intersticiales se ilustraron en la tabla 3-6. Los átomos o los iones intersticiales, aunque son mucho menores que los átomos o los iones que están en los puntos de red, son mayores que los sitios intersticiales que ocupan; en consecuencia, la región cristalina vecina está comprimida y distorsionada. Los átomos intersticiales como los de hidrógeno están presentes, con frecuencia, como impurezas, mientras que los átomos de carbono se agregan en forma intersticial al hierro para producir acero. Para concentraciones pequeñas, los átomos de carbono ocupan sitios intersticiales en la estructura cristalina del hierro e introducen un esfuerzo en la región del cristal en su cercanía. Si hay dislocaciones en los cristales al tratar de mover esos tipos de defectos, se encuentran con resistencia a su movimiento, con lo que se vuelve difícil crear deformación permanente en metales y aleaciones. Ésta es una forma importante de aumentar la resistencia de los materiales metálicos. A diferencia de las vacancias, una vez introducidos, la cantidad de átomos o iones intersticiales en la estructura permanece casi constante, aun cuando se cambie la temperatura.

EJEMPLO 4-3**Sitios para el carbono en el hierro**

En el hierro FCC, los átomos de carbono están en sitios *octaédricos* en el centro de cada arista de la celda unitaria ($1/2, 0, 0$) y en el centro de la misma ($1/2, 1/2, 1/2$). En el hierro BCC, los átomos de carbono entran en sitios *tetraédricos*, como $1/4, 1/2, 0$. El parámetro de red es 0.3571 nm para el hierro FCC y de 0.2866 nm para el hierro BCC. Suponga que los átomos de carbono tienen un radio de 0.071 nm . 1) ¿Cabe esperar una mayor distorsión del cristal por un átomo de carbono intersticial en el hierro FCC o BCC? 2) ¿Cuál sería el porcentaje atómico de carbono en cada clase de hierro si se llenaran los sitios intersticiales?

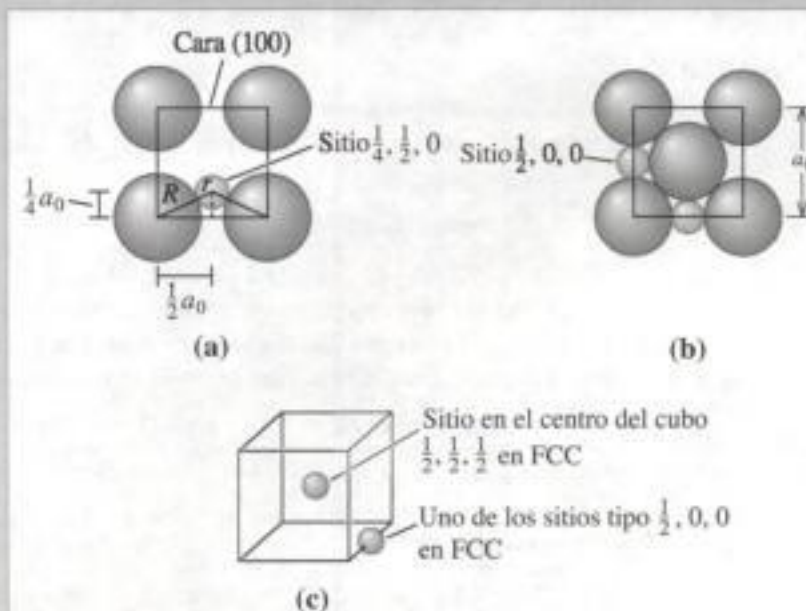


Figura 4-2 (a) Ubicación del sitio intersticial $\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, 0$ en metales BCC, que muestra el arreglo de los átomos normales y del átomo intersticial (b) sitio $\frac{1}{2}, 0, 0$ en metales FCC (para el ejemplo 4-3). (c) Centros de arista y centros de cubo en algunos de los sitios intersticiales en la estructura FCC (ejemplo 4-3).

SOLUCIÓN

1. Podríamos calcular el tamaño del sitio intersticial en el lugar $1/4, 1/2, 0$ con ayuda de la figura 4-2(a). El radio R_{BCC} del átomo de hierro es:

$$R_{\text{BCC}} = \frac{\sqrt{3}a_0}{4} = \frac{(\sqrt{3})(0.2866)}{4} = 0.1241 \text{ nm}$$

En la figura 4-2(a) se observa que:

$$\left(\frac{1}{2}a_0\right)^2 + \left(\frac{1}{4}a_0\right)^2 = (r_{\text{intersticial}} + R_{\text{BCC}})^2$$

$$(r_{\text{intersticial}} + R_{\text{BCC}})^2 = 0.3125a_0^2 = (0.3125)(0.2866 \text{ nm})^2 = 0.02567 \text{ nm}^2$$

$$r_{\text{intersticial}} = \sqrt{0.02567} - 0.1241 = 0.0361 \text{ nm}$$

Para el hierro FCC, un sitio intersticial como el $1/2, 0, 0$, está a lo largo de las direcciones $\langle 100 \rangle$. Así, el radio del átomo de hierro y el radio del sitio intersticial son [Fig. 4-2(b)]:

$$R_{\text{FCC}} = \frac{\sqrt{2}a_0}{4} = \frac{(\sqrt{2})(0.3571)}{4} = 0.1263 \text{ nm}$$

$$2r_{\text{intersticial}} + 2R_{\text{FCC}} = a_0$$

$$r_{\text{intersticial}} = \frac{0.3571 - (2)(0.1263)}{2} = 0.0522 \text{ nm}$$

El sitio intersticial en el hierro BCC es menor que en el hierro FCC. Aunque los dos son menores que el átomo de carbono, éste distorsiona más la estructura cristalina BCC que la FCC. En consecuencia, se espera que menos átomos de carbono entren a las posiciones intersticiales en el hierro BCC que en el hierro FCC.

2. En el hierro BCC se espera que dos átomos de hierro estén en cada celda unitaria. Se puede determinar un total de 24 sitios intersticiales del tipo $1/4, 1/2, 0$; sin embargo, como cada sitio está en una cara de la celda unitaria, sólo la mitad de cada sitio pertenece en forma exclusiva a una sola celda. Entonces:

$$(24 \text{ sitios}) \left(\frac{1}{2}\right) = 12 \text{ sitios intersticiales por celda unitaria}$$

Si se llenaran todos los sitios intersticiales, el porcentaje atómico de carbono contenido en el hierro sería:

$$\text{de \% de C} = \frac{12 \text{ átomos}}{12 \text{ átomos de C} + 2 \text{ átomos de Fe}} \times 100 = 86\%$$

En el hierro FCC se espera que haya cuatro átomos de hierro en cada celda unitaria, y la cantidad de sitios intersticiales octaédricos es:

$$(12 \text{ aristas}) \left(\frac{1}{4}\right) + 1 \text{ centro} = 4 \text{ sitios intersticiales por celda unitaria [Fig. 4-2(c)].}$$

Una vez más, si todos los sitios intersticiales octaédricos se llenaran, el porcentaje atómico de carbono en el hierro FCC sería:

$$\text{de \% de C} = \frac{4 \text{ átomos de C}}{4 \text{ átomos de C} + 4 \text{ átomos de Fe}} \times 100 = 50\%$$

Como explicaremos en un capítulo posterior, el porcentaje máximo de carbono en las dos formas de hierro, bajo condiciones de equilibrio, es:

BCC: 1.0%

FCC: 8.9%

A causa de la deformación que sufre la estructura cristalina del hierro, debido a los átomos intersticiales y en particular en el hierro BCC, la fracción de los sitios intersticiales que se puede ocupar es bastante pequeña.

Defecto sustitucional Se introduce un **defecto sustitucional** cuando un átomo o ion es sustituido con un tipo distinto de átomo o ion, como en la figura 4-1(c) y (d). Los átomos o iones sustitucionales ocupan el sitio normal en la red. Pueden ser mayores que los átomos o iones normales en la estructura cristalina, en cuyo caso se reducen los espacios interatómicos vecinos, o pueden ser menores, lo cual causará que los átomos vecinos tengan distancias interatómicas mayores. En ambos casos, los defectos sustitucionales perturban al cristal que los rodea. De nuevo, los defectos sustitucionales se pueden introducir en forma de una impureza o de una adición deliberada en la aleación; una vez introducidos, la cantidad de defectos es relativamente independiente de la temperatura.

Como ejemplos de defectos sustitucionales se encuentra la incorporación de dopantes, como fósforo (P) o boro (B) en el Si. En forma parecida, si se agregara cobre al níquel, los átomos de cobre ocuparían los sitios cristalográficos donde normalmente habría átomos de níquel. Los átomos de sustitución suelen aumentar la resistencia del material metálico. También aparecen defectos sustitucionales en materiales cerámicos. Por ejemplo, si se agrega MgO al NiO, los iones Mg^{+2} ocupan los sitios del Ni^{+2} y los iones de O^{-2} del MgO ocupan los sitios O^{-2} del NiO. El que los átomos o los iones agregados vayan a sitios intersticiales o sustitucionales depende del tamaño y de la valencia de los átomos o iones huésped, en comparación con el tamaño y la valencia de los iones anfitrión. El tamaño de los sitios disponibles también tiene influencia en esto.

Veamos un poco más detalladamente el ejemplo de los átomos de P o de B. En el capítulo 3, vimos que el silicio tiene una estructura cúbica de diamante. Los semiconductores que no contienen concentraciones apreciables de dopantes o impurezas se llaman **semiconductores intrínsecos**. Cuando se agregan pequeñas concentraciones de P o de B al cristal de silicio, esos átomos ocupan sitios cristalográficos en los que normalmente residen átomos de silicio. Recuérdese que el Si tiene una valencia de 4. Normalmente, el P tiene una valencia de 5. Cuando los átomos de P ocupan sitios de Si, se enlazan con otros cuatro átomos vecinos de Si. Sin embargo, los átomos de P no pueden encontrar un átomo más de Si con el que puedan formar un enlace. El resultado es que cada átomo de P agregado tiene un electrón "extra" que no se puede aparear con un átomo de Si para formar un quinto enlace Si-P. A bajas temperaturas ($\sim < 50$ K) este electrón adicional permanece enlazado al átomo de P por atracción electrostática. Sin embargo, cuando aumenta la temperatura, este electrón se desprende del átomo de P y queda disponible para la conducción. Se dice que P es un dopante donador del Si. Cada átomo de P que se agrega trae consigo un electrón que puede quedar disponible para la conducción. Ésta es la forma en que el P en el Si imparte una **semiconductividad tipo n** al Si. Un semiconductor tipo n contiene elementos que ceden electrones (por ejemplo P en Si). De forma parecida, el boro, con una valencia de 3 y que por consiguiente necesita un electrón para formar cuatro enlaces con átomos de Si, proporciona una semiconductividad tipo p al Si. Un **semiconductor tipo p** contiene elementos que aceptan electrones (por ejemplo, B en Si). Los **semiconductores extrínsecos** son los que contienen dopantes o impurezas. Dado que se puede controlar cuánto se agrega de P o de B, es posible controlar con precisión la cantidad de conductividad en el Si. Se fabrican dispositivos útiles, como transistores, dopando en forma selectiva distintas regiones de un cristal de silicio, usando dopantes como P, arsénico (As) o B. Por supuesto, ¡estos dispositivos permitieron la revolución de la computación y de la tecnología de la información!

EJEMPLO 4-4 Dopantes en un semiconductor de germanio

Tres muestras separadas de cristales de germanio (Ge) contienen pequeñas concentraciones de silicio (Si), arsénico (As) o boro (B) como dopantes. Con base en la valencia de esos elementos, ¿qué clase de semiconductividad se espera con esos materiales? Suponga que esos elementos ocupan los sitios del Ge.

SOLUCIÓN

El germanio se parece al silicio; es un semiconductor con estructura cristalina cúbica de diamante. Cada átomo de Ge está enlazado con otros cuatro átomos de Ge. Cuando se agrega Si al Ge, los átomos de silicio pueden formar cuatro enlaces con los átomos vecinos de Ge. El resultado es que no hay necesidad de donar ni aceptar electrones. El material que se obtiene no muestra conductividad "tipo p" o "tipo n"; se comporta como un semiconductor intrínseco. Recientemente, se ha demostrado que las aleaciones a base de Si y Ge son útiles en *chips* de computadoras ultrarrápidas.

Cuando se agrega As, cabe esperar conductividad tipo n, ya que cada átomo de As trae consigo cinco electrones de valencia; sin embargo, sólo se puede enlazar con cuatro átomos de Ge y, en consecuencia, puede quedar disponible un electrón para la conducción. Al contrario, cuando se agregan bajas concentraciones de B al Ge, cabe esperar conductividad tipo p en el material resultante, porque el B tiene valencia 3.

4-2

Otros defectos puntuales

Una **intersticialidad** (o defecto puntual autointersticial) se crea cuando un átomo idéntico a los puntos normales de red está en una posición intersticial. Es más probable encontrar estos defectos en estructuras cristalinas que tienen bajo factor de empaquetamiento.

Un **defecto de Frenkel**, o par de Frenkel, es un par vacancia-intersticial que se forma cuando un ion salta de un punto normal de red a un sitio intersticial, como se ve en la figura 4-1(e), y deja atrás una vacancia. Aunque esto se describe para un material iónico, en los metales y en los materiales con enlaces covalentes puede presentarse un defecto de Frenkel. Un **defecto de Schottky**, figura 4-1(f), es exclusivo de los materiales iónicos, y suele encontrarse en muchos materiales cerámicos. En este defecto, las vacancias se presentan en un material con enlaces iónicos; donde debe faltar un número estequiométrico de aniones y cationes en el cristal si se quiere conservar en él la neutralidad eléctrica. Por ejemplo, un Mg^{+2} y un O^{-2} iones faltantes en MgO constituyen un par de Schottky. En el ZrO_2 , por un ion Zr^{+4} faltante, habrá 2 iones O^{-2} faltantes.

Un defecto puntual sustitucional importante se presenta cuando un ion de una carga reemplaza a otro de carga distinta. Éste sería el caso cuando un ion de valencia +2 reemplaza a otro de valencia +1 (Fig. 4-3). En este caso, se introduce una carga positiva adicional en la

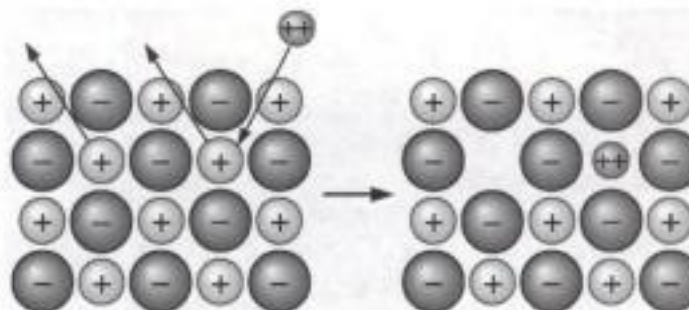


Figura 4-3
Cuando un catión divalente reemplaza a uno monovalente, también se debe quitar un segundo catión monovalente, con lo que se crea una vacancia.

estructura. Para mantener el equilibrio de cargas, se podría crear una vacancia donde normalmente estaría ubicado un catión $+1$. Nuevamente, esta imperfección se observa en materiales con un enlazamiento iónico pronunciado.

Así, en los sólidos iónicos, cuando se introducen defectos puntuales, se deben observar las reglas siguientes:

- a) se debe mantener un equilibrio de cargas, para que el material cristalino en su totalidad sea eléctricamente neutro;
- b) se debe mantener un balance de masa y
- c) se debe conservar la cantidad de sitios cristalográficos.

Por ejemplo, en el óxido de níquel, NiO , si falta un ion oxígeno se crea su vacancia correspondiente (representada por V_{O}). Cada punto (.) sobrepuesto indica una carga eléctrica positiva efectiva de uno. Para mantener la estequiometría, el balance de material y el equilibrio de cargas, también se debe crear una vacancia de ion níquel (representada por V'_{Ni}). Cada apóstrofo (') indica una carga negativa efectiva de uno.

Usaremos la **notación de Kröger-Vink** para escribir las ecuaciones químicas de los defectos. En esta notación, la letra principal describe una vacancia o el nombre del elemento. El índice indica la carga efectiva del defecto, y el subíndice describe el lugar del defecto. Un punto (.) indica una carga positiva efectiva de 1, y un apóstrofo (') representa una carga efectiva de -1 . A veces se usa x para indicar que no hay carga neta. Todos los electrones libres o los huecos se indican como e y h , respectivamente. Los grupos de defectos o los defectos asociados se muestran entre paréntesis. Los defectos asociados, que pueden afectar el transporte de masa en los materiales, a veces son neutros y difíciles de detectar en forma experimental. Las concentraciones de defectos se indican con corchetes [].

En el siguiente ejemplo se ilustra la notación de Kröger-Vink para escribir las **reacciones químicas de los defectos**. A veces es posible escribir distintas reacciones químicas entre defectos, las cuales son válidas para describir la posible química de esos defectos. En esos casos, es necesario tener en cuenta la energía que se requiere para crear los distintos defectos, y se hace necesaria una verificación experimental. Esta notación es útil en la descripción de la química de defectos en los semiconductores y en muchos materiales cerámicos que se usan como sensores, dieléctricos y en otras aplicaciones.

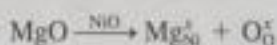
EJEMPLO 4-5

Aplicación de la notación de Kröger-Vink

Escriba las reacciones adecuadas de los defectos para 1) incorporación de óxido de magnesio (MgO) en el óxido de níquel (NiO) y 2) la formación de un defecto de Schottky en la alúmina (Al_2O_3).

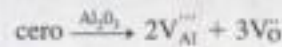
SOLUCIÓN

1. El MgO es el huésped y el NiO es el material anfitrión. Supondremos que los iones Mg^{+2} ocupan sitios de Ni^{+2} y que los aniones del MgO ocupan sitios de O^{-2} del NiO .



Debemos asegurarnos de que la ecuación está balanceada en carga, masa y sitios. En el lado izquierdo tenemos un Mg, un oxígeno y no hay carga neta. Lo mismo sucede en el lado derecho. El balance de sitios es un poco difícil: un Mg^{+2} ocupa un sitio Ni^{+2} . Como estamos introduciendo MgO en NiO , usamos un sitio de Ni^{+2} y, en consecuencia, debemos usar un sitio de O^{-2} . Podemos observar que esto es cierto examinando el lado derecho de esta ecuación.

2. Un defecto de Schottky en la alúmina implica la falta de dos iones aluminio y tres iones oxígeno que dejaron el cristal. Cuando falta un ion aluminio, queda una vacancia en el sitio del aluminio y, como falta una carga positiva 3, el sitio queda con una carga negativa efectiva de -3 . Entonces, lo que describe una vacancia de un Al^{+3} es V_{Al}''' . De modo similar, $V_{\text{O}}^{\bullet}$ representa una vacancia de ion oxígeno. Para que haya balance de sitios en la alúmina, debemos asegurar que por cada dos sitios de ion aluminio se usen tres sitios de ion oxígeno. Como tenemos vacancias, la masa del lado izquierdo es cero, por lo que se escribe cero como lado izquierdo. Entonces, la reacción del defecto será:



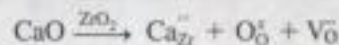
EJEMPLO 4-6

Defectos puntuales en zirconia estabilizada para electrolitos sólidos

Escriba las reacciones correctas de defectos para la incorporación de óxido de calcio (CaO) en zirconia (ZrO_2) usando la notación de Kröger-Vink.

SOLUCIÓN

Supondremos que el Ca^{+2} ocupa sitios de Zr^{+4} . Si mandamos un Ca^{+2} a un sitio de Zr^{+4} , ese sitio tendrá una carga negativa efectiva de -2 , ya que en lugar de una carga de $+4$ tenemos una de $+2$. Hemos usado un sitio de Zr^{+4} , y para el balance de sitios necesitaríamos usar *dos sitios de oxígeno*. Podemos mandar un O^{-2} del CaO a uno de los sitios del O^{-2} en el ZrO_2 . Se debe usar el otro sitio de oxígeno, y como también se debe mantener el balance de masa, habrá que mantener vacío este sitio; es decir, se debe crear una vacancia de ion oxígeno.



La concentración de vacancias de oxígeno en el ZrO_2 (es decir, $[V_{\text{O}}^{\bullet}]$) aumentará al aumentar la concentración de CaO . Estas vacancias de ion oxígeno hacen que el ZrO_2 estabilizado sea conductor iónico. Esto explica el uso de esta clase de ZrO_2 en los sensores de oxígeno que se usan en los automóviles y en las celdas de combustibles sólidas de óxido, como se describió en el capítulo 3.

4.3

Dislocaciones

Las **dislocaciones** son imperfecciones lineales en un cristal que de otra manera sería perfecto. Se suelen introducir en el cristal durante la solidificación del material o cuando el material se deforma permanentemente. Aunque en todos los materiales, incluyendo cerámicos y polímeros, hay dislocaciones, *son especialmente útiles para explicar la deformación y el endurecimiento de los materiales metálicos*. Se pueden identificar tres clases de dislocaciones: de tornillo, de borde y mixta.

Dislocaciones de tornillo La **dislocación de tornillo** (Fig. 4-4) se puede ilustrar haciendo un corte parcial en un cristal perfecto y, a continuación, torciendo ese cristal una distancia atómica. Si se sigue un plano cristalográfico durante una revolución respecto al eje de torcimiento del cristal, comenzando en el punto x y recorriendo distancias interatómicas iguales en cada dirección, se termina una distancia atómica abajo del punto de partida (el punto y). El vector necesario para terminar el circuito y regresar al punto de partida es el **vector de Burgers b** . [2] Si se continuara la rotación, se describiría una trayectoria espiral. El eje o línea

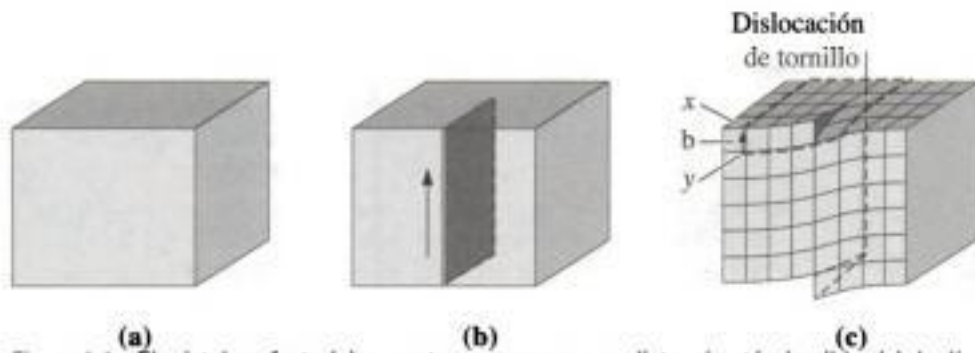


Figura 4-4 El cristal perfecto (a) se corta y se ranura una distancia atómica (b) y (c). La línea a lo largo de la cual se hace el corte es una dislocación de tornillo. Se requiere un vector de Burgers **b** para cerrar un ciclo de distancias atómicas iguales en torno a la dislocación de tornillo.

respecto al cual se traza la trayectoria es la dislocación de tornillo. El vector de Burgers es paralelo a la dislocación de tornillo.

Dislocaciones de borde o arista Una dislocación de borde (Fig. 4-5) se puede ilustrar haciendo un corte parcial en un cristal perfecto, abriendo el cristal y llenando en parte el corte con un plano adicional de átomos. La orilla inferior de este plano insertado representa la dislocación de borde. Si se describe un circuito en torno a la dislocación de borde, en sentido de las manecillas del reloj comenzando en el punto *x* y recorriendo una cantidad igual de distancias atómicas en cada dirección, se terminará en el punto *y*, a una distancia atómica del punto de partida. El vector necesario para cerrar el circuito es, de nuevo, el vector de Burgers. En este caso, el vector de Burgers es perpendicular a la dislocación. Al introducir la dislocación, los átomos que están arriba de la línea de dislocación están muy comprimidos entre sí, mientras que los de abajo están muy distendidos. La región vecina del cristal se ha perturbado por la presencia de la dislocación. [Esto se ilustrará después, en la figura 4-8(b).] A diferencia de una **dislocación de borde o arista**, una de tornillo no se puede visualizar como un semiplano adicional de átomos.[3]

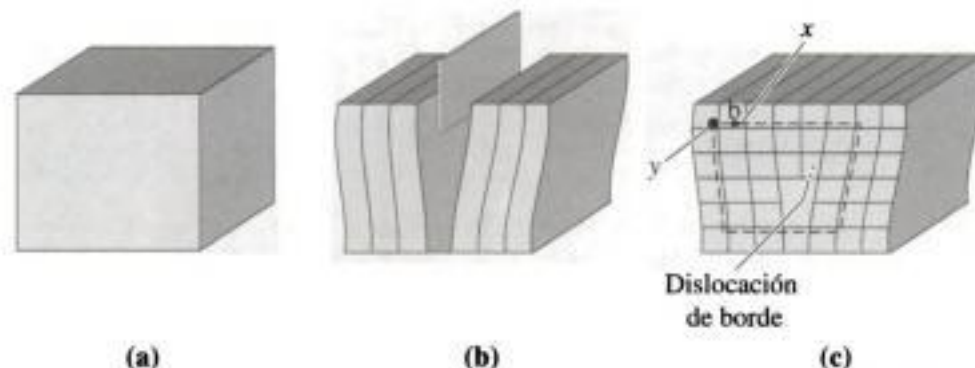


Figura 4-5 El cristal perfecto en (a) se corta y se intercala un plano adicional de átomos (b). El borde inferior del plano adicional es una dislocación de borde (c). Se requiere un vector de Burgers **b** para cerrar un circuito de distancias atómicas iguales en torno a la dislocación de borde. (Adaptado de J.D. Verhoeven, *Fundamentals of Physical Metallurgy*, Wiley, 1975.)

Dislocaciones mixtas Como se observa en la figura 4-6, las **dislocaciones mixtas** tienen componentes de borde y de tornillo, con una región de transición entre ellas. Sin embargo, el vector de Burgers queda igual para todas las porciones de la dislocación mixta.

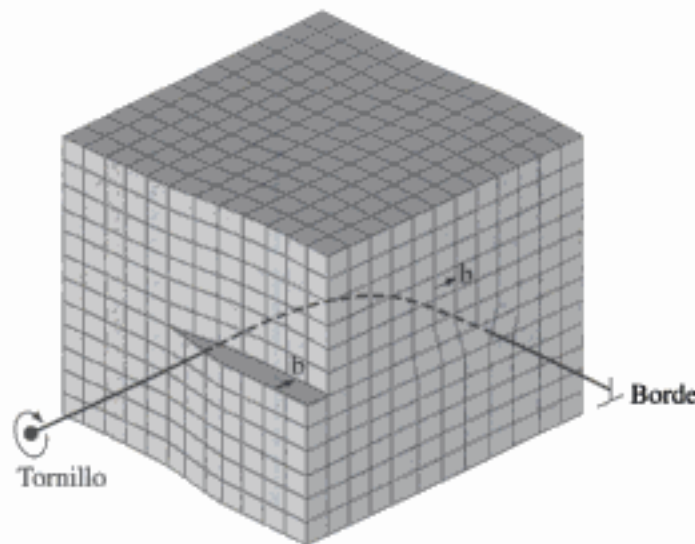


Figura 4-6
Dislocación mixta. La dislocación de tornillo en la cara frontal del cristal cambia en forma gradual a dislocación de borde en el lado del cristal. (Adaptado de W. T. Read, *Dislocations in Crystals*, McGraw-Hill, 1953.)

En la figura 4-7 se ve un esquema de la línea de deslizamiento, el plano de deslizamiento y el vector de deslizamiento (vector de Burgers). El vector de Burgers y el plano ayudan a explicar cómo se deforman los materiales.

Cuando se aplica una fuerza cortante en la dirección del vector de Burgers a un cristal que contenga una dislocación, ésta se puede mover, rompiendo los enlaces de los átomos en un plano. El plano de corte se desplaza un poco para establecer enlaces con el plano parcial de átomos originales. El desplazamiento hace que la dislocación se mueva una distancia atómica hacia el lado, como se observa en la figura 4-8(a). Si continúa este proceso, la dislocación se mueve a través del cristal hasta que se produce un escalón en el exterior del mismo; el cristal se ha deformado plásticamente. Otra analogía es el movimiento de avance de una oruga [Fig. 4-8(d)]. Levanta algunas de sus patas en determinado momento, y usa el movimiento para ir de un lado a otro, sin levantar todas las patas al mismo tiempo. Una gran diferencia entre el movimiento de una oruga y el de una dislocación ¡es la velocidad con que se mueven! La velocidad con la que se propagan las dislocaciones en los materiales ¡es cercana o mayor que la velocidad del sonido! [4] Otra forma de visualizar esto es imaginar cómo se movería una onda en una alfombra si

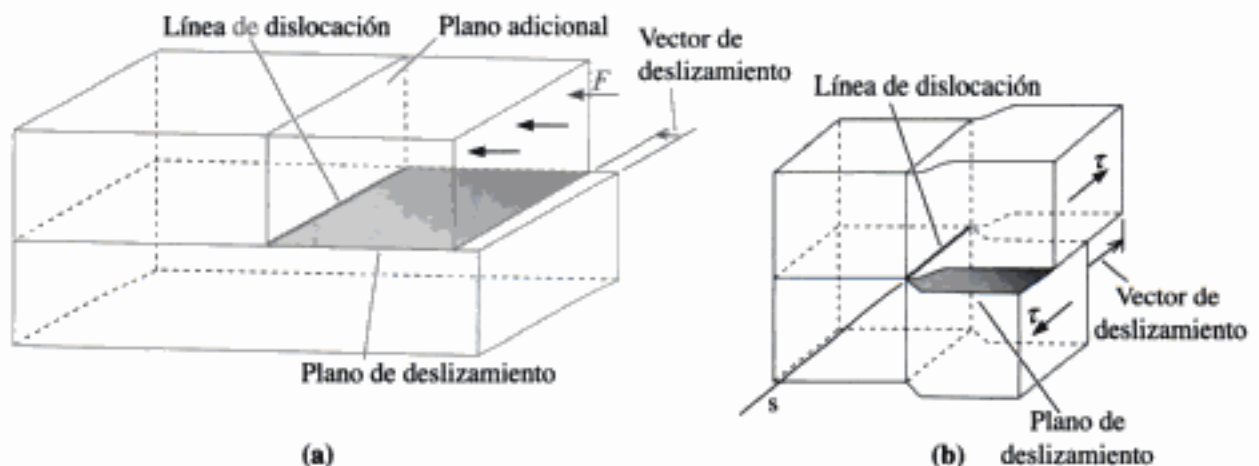


Figura 4-7 Esquema de línea de deslizamiento, plano de deslizamiento y vector de deslizamiento (de Burgers) para (a) una dislocación de borde y (b) una dislocación de tornillo. (Adaptado de J.D. Verhoeven, *Fundamentals of Physical Metallurgy*, Wiley, 1975.)

tratáramos de eliminarla aplanándola en lugar de levantar la alfombra. Si se pudieran introducir dislocaciones en forma continua en un lado del cristal, moviéndose a través del cristal por la misma trayectoria, el cristal terminaría por quedar cortado a la mitad.

Deslizamiento El proceso por el que se mueve una dislocación y hace que se deforme un material metálico se llama **deslizamiento**. La dirección en la que se mueve la dislocación es la **dirección de deslizamiento**, y es la del vector de Burgers para las dislocaciones de borde, como se observa en la figura 4-8(b). Durante el deslizamiento, la dislocación de borde recorre el plano formado por el vector de Burgers y ella misma. A este plano se le llama **plano de deslizamiento**. La combinación de la dirección de deslizamiento y el plano de deslizamiento es el **sistema de deslizamiento**. Una dislocación de tornillo produce el mismo resultado: la dislocación se mueve en una dirección perpendicular al vector de Burgers, aunque el cristal se deforma en dirección paralela a ese vector. Como el vector de Burgers de una dislocación de tornillo es paralelo a la línea de dislocación, la especificación del vector de Burgers y de la línea de dislocación, no define un plano de deslizamiento para una dislocación de tornillo. Como se dijo en el capítulo 3, hay nuevos paquetes de programas que se han desarrollado, cuyo uso puede ser muy eficaz para visualizar algunos de estos conceptos.

Durante el deslizamiento, una dislocación se mueve desde un conjunto de entornos hasta otro conjunto idéntico de entornos. Se requiere el **esfuerzo de Peierls-Nabarro** (ecuación 4-2) para mover la dislocación desde un lugar de equilibrio hasta el siguiente:

$$\tau = c \exp(-kd/b), \quad (4-2)$$

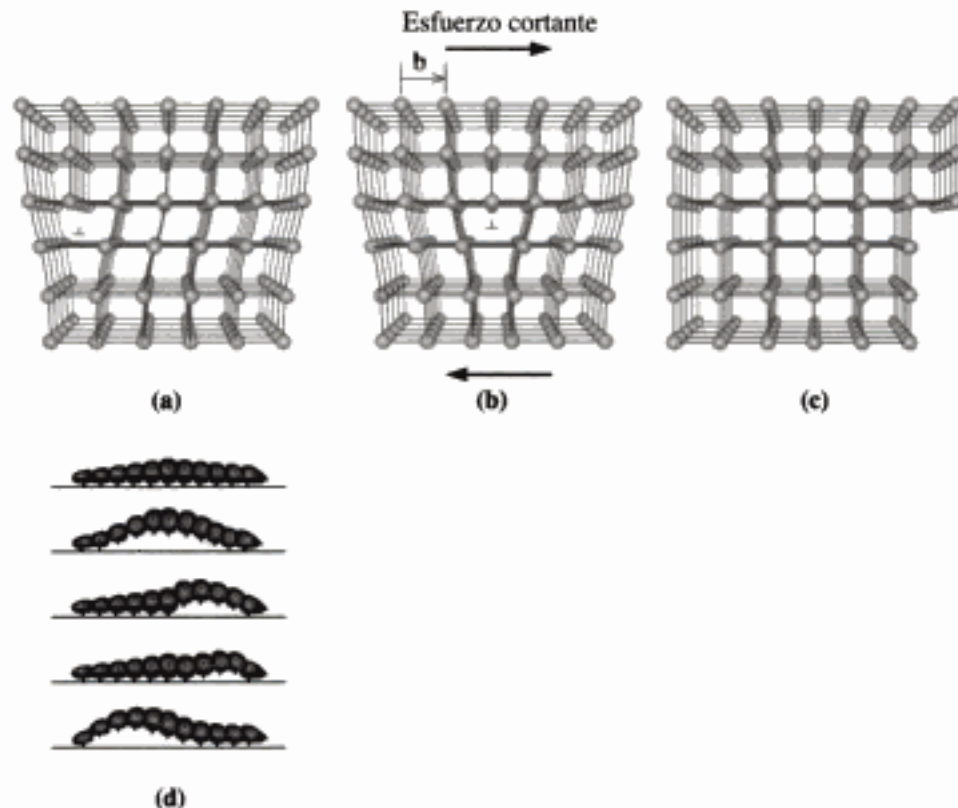


Figura 4-8 (a) Cuando se aplica un esfuerzo cortante a la dislocación en (a), los átomos se desplazan y hacen que la dislocación se mueva un vector de Burgers en la dirección de deslizamiento (b). El movimiento continuo de la dislocación crea al final un escalón (c) y el cristal queda deformado. (Adaptado de A.G. Guy, *Essentials of Materials Science*, McGraw-Hill, 1976.) (d) El movimiento de una oruga es parecido al de una dislocación.

TABLA 4-1 ■ Planos y direcciones de deslizamiento en estructuras metálicas

Estructura cristalina	Plano de deslizamiento	Dirección de deslizamiento
Metales BCC	{110}	{111}
	{112}	
	{123}	
Metales FCC	{111}	{110}
Metales HCP	{0001}	{100}
	{11 $\bar{2}$ 0} Ver	{110}
	{10 $\bar{1}$ 0} la nota	o {11 $\bar{2}$ 0}
	{10 $\bar{1}$ 1}	
	{110}	
MgO, NaCl (iónicos)	{110}	{110}
Silicio (covalente)	{111}	{110}

Nota: Estos planos son activos en algunos metales y aleaciones o a temperaturas elevadas.

donde τ es el esfuerzo cortante necesario para mover la dislocación, d es la distancia interplanar entre los planos de deslizamiento adyacentes, b es la magnitud del vector de Burgers y c y k son constantes del material. La dislocación se mueve en un sistema de deslizamiento que requiera la menor disipación de energía. Deben existir varios factores importantes para determinar los sistemas más probables de deslizamiento:

1. El esfuerzo necesario para hacer que la dislocación se mueva aumenta en forma exponencial con la longitud del vector de Burgers. Así, la dirección de deslizamiento debe tener una distancia pequeña de repetición o una alta densidad lineal. Las direcciones de empaquetamiento compacto en los metales y las aleaciones satisfacen este criterio y son las direcciones normales de deslizamiento.
2. El esfuerzo necesario para hacer que la dislocación se mueva disminuye en forma exponencial al aumentar la distancia interplanar de los planos de deslizamiento. El deslizamiento es más fácil entre planos de átomos que son lisos (que tienen "cumbres y valles" más suaves en su superficie) y entre planos que están alejados entre sí o que tienen una distancia interplanar relativamente grande. Los planos con una gran densidad planar llenan este requisito. En consecuencia, los planos de deslizamiento suelen ser los de empaquetamiento compacto o los que tengan un empaquetamiento lo más compacto posible. Los sistemas comunes de deslizamiento en varios materiales se resumen en la tabla 4-1.
3. Las dislocaciones no se mueven con facilidad en materiales como el silicio o los polímeros, que tienen enlaces covalentes. Debido a la fuerza y la direccionalidad de los enlaces, esos materiales suelen fallar por fractura frágil antes de que la fuerza sea suficientemente grande como para causar un deslizamiento apreciable. Se debe tener en cuenta que en muchos polímeros diseñados, las dislocaciones representan un papel relativamente pequeño en la deformación. Como se describió en el capítulo 3, la mayoría de los polímeros contienen fracciones apreciables de volumen que son amorfas. En muchos polímeros, es posible una deformación apreciable sin fractura porque, cuando se aplica un esfuerzo, las cadenas de polímero se enredan.
4. Los materiales con enlazamiento iónico, incluyendo muchos cerámicos como el MgO, también son resistentes al deslizamiento. El movimiento de una dislocación interrumpe el balance de cargas en torno a los aniones y los cationes, y se requiere romper los enlaces entre aniones y cationes. Durante el deslizamiento, los iones con carga igual también deben pasar cerca unos de otros, causando repulsión. Por último, la distancia de repetición a lo largo de la dirección de deslizamiento, o el vector de Burgers, es mayor que en los metales y aleaciones. De nuevo, suele presentarse la fractura frágil del material cerámico, a causa de la presencia de imperfecciones como pequeños agujeros (poros) antes de que el valor del esfuerzo aplicado sea suficiente para hacer que las dislocaciones se muevan. Se puede obtener ductilidad en los materiales cerámicos mediante:

- a) transformaciones de fase (llamadas plasticidad por transformación; un ejemplo sería la zirconia totalmente estabilizada);
- b) maclado mecánico;
- c) movimiento de dislocación y
- d) deslizamiento en límites de grano.[5]

Normalmente, las mayores temperaturas y esfuerzos de compresión causan mayor ductilidad. En fecha reciente se demostró que ciertos cerámicos, como el titanato de estroncio (SrTiO_3), pueden tener una ductilidad considerable.[6] También veremos más adelante que, bajo ciertas condiciones, los cerámicos pueden tener deformaciones muy grandes. Este comportamiento se llama superplasticidad y se describe en capítulos posteriores.

EJEMPLO 4-7 Dislocaciones en materiales cerámicos

En la figura 4-9, se muestra un esquema de una dislocación en óxido de magnesio (MgO), que tiene la estructura cristalina del cloruro de sodio y un parámetro de red de 0.396 nm. Determine la longitud del vector de Burgers.

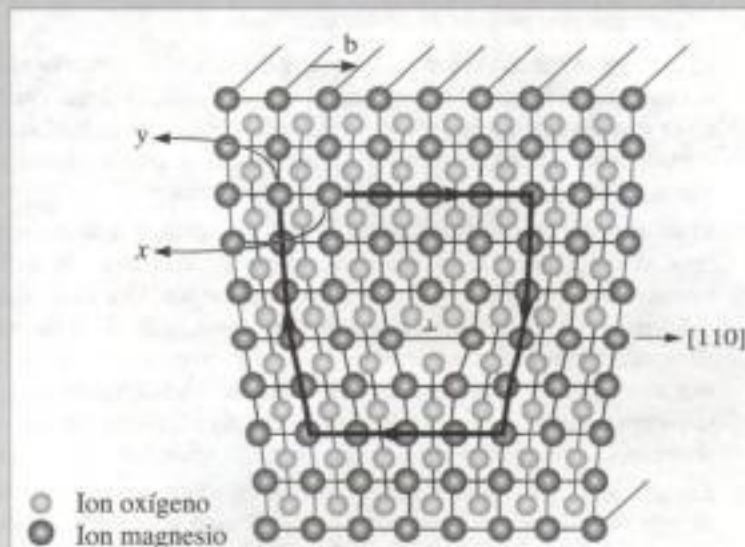


Figura 4-9 Dislocación de borde en MgO que muestra la dirección de deslizamiento y el vector de Burgers (para el ejemplo 4-7). (Adaptado de W.D. Kingery, H.K. Bowen y D. R. Uhlmann, *Introduction to Ceramics*, John Wiley, 1976.)

SOLUCIÓN

En la figura 4-9 iniciamos un circuito en sentido de las manecillas del reloj, en torno a la dislocación en el punto x , moviéndose distancias atómicas iguales para terminar en el punto y . El vector $\mathbf{b}$ es el vector de Burgers. Como $\mathbf{b}$ tiene la dirección $[110]$, debe ser perpendicular a los planos $\{110\}$. La longitud de $\mathbf{b}$ es la distancia entre dos planos $\{110\}$ adyacentes. Según la ecuación 3-7,

$$d_{110} = \frac{a_0}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} = \frac{0.396}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 0^2}} = 0.280 \text{ nm}$$

El vector de Burgers tiene una dirección $\langle 110 \rangle$ y una longitud 0.280 nm. Sin embargo, obsérvese que la dislocación está formada por dos semiplanos adicionales: uno forma-

do por iones oxígeno y uno por iones magnesio (Fig. 4-9). Obsérvese que esta fórmula para calcular la magnitud del vector de Burgers no es válida para sistemas no cúbicos. Lo mejor es considerar que la magnitud del vector de Burgers es igual a la distancia de repetición en la dirección del deslizamiento.

EJEMPLO 4-8 Cálculo del vector de Burgers

Calcule la longitud del vector de Burgers en el cobre.

SOLUCIÓN

El cobre tiene una estructura cristalina FCC. El parámetro de red del cobre (Cu) es 0.36151 nm. Las direcciones de empaquetamiento compacto, que son las del vector de Burgers, tienen la forma $\langle 110 \rangle$. La distancia de repetición, a lo largo de las direcciones $\langle 110 \rangle$ es la mitad de la diagonal de la cara, porque los puntos de red están en los vértices y en los centros de las caras [Fig. 4-10(a)].

$$\text{Diagonal de la cara} = \sqrt{2}a_0 = (\sqrt{2})(0.36151) = 0.51125 \text{ nm}$$

La longitud del vector de Burgers, o la distancia de repetición, es:

$$b = \frac{1}{2} (0.51125 \text{ nm}) = 0.25563 \text{ nm.}$$

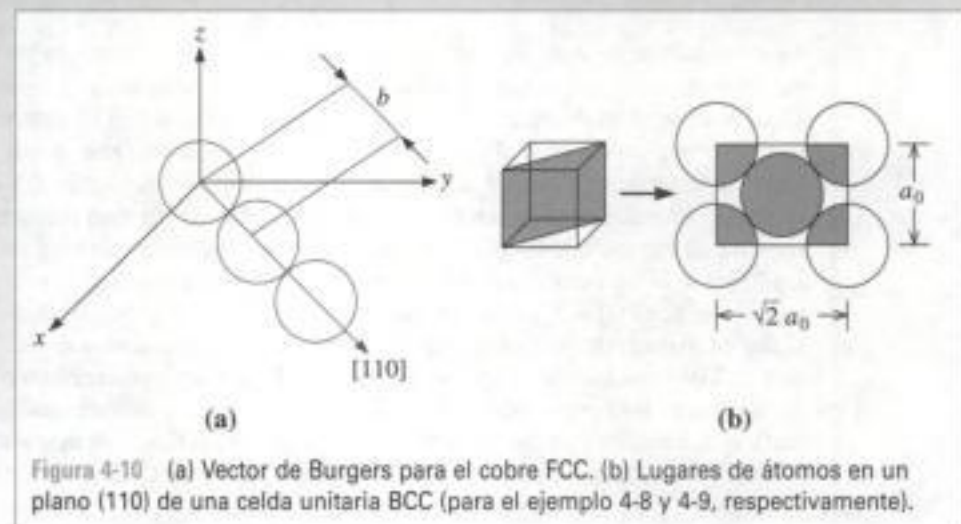


Figura 4-10 (a) Vector de Burgers para el cobre FCC. (b) Lugares de átomos en un plano (110) de una celda unitaria BCC (para el ejemplo 4-8 y 4-9, respectivamente).

EJEMPLO 4-9 Identificación de los planos de deslizamiento preferenciales

La densidad planar del plano (112) en el hierro BCC es 9.94×10^{14} átomos/cm². Calcule 1) la densidad planar del plano (110) y 2) las distancias interplanares para los planos (112) y (110). ¿En cuál plano se presentaría normalmente deslizamiento?

SOLUCIÓN

El parámetro de red del hierro BCC es 0.2866 nm = 2.866×10^{-8} cm. El plano (110) se muestra en la figura 4-10(b), sombreada la parte de los átomos en el interior de la celda unitaria. Obsérvese que la cuarta parte de los cuatro átomos de los vértices más el átomo central, están dentro de un área $a_0 \times \sqrt{2}a_0$.

1. La densidad planar es

$$\text{Densidad planar (110)} = \frac{\text{átomos}}{\text{área}} = \frac{2}{(\sqrt{2})(2.866 \times 10^{-8} \text{ cm})^2} \\ = 1.72 \times 10^{15} \text{ átomos/cm}^2$$

Densidad planar (112) = 0.994×10^{15} átomos/cm² (de acuerdo con el planteamiento del problema).

2. Las distancias interplanares son:

$$d_{110} = \frac{2.866 \times 10^{-8}}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 0}} = 2.0266 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

$$d_{112} = \frac{2.866 \times 10^{-8}}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 2^2}} = 1.17 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

La densidad planar y la distancia interplanar del plano (110) son mayores que las del plano (112); en consecuencia, el plano (110) sería el plano preferido de deslizamiento.

44

Observación de dislocaciones

La existencia de las dislocaciones fue postulada unos 25 años antes que los primeros informes de su observación.[7,8] Los lugares donde las dislocaciones intersecan la superficie de un cristal son sitios de energía relativamente alta. Cuando se ataca un metal, con un tratamiento de reacción química que implica exponer al metal a un ácido o una base, las áreas donde las dislocaciones llegan a la superficie del cristal reaccionan con más rapidez que las partes que las rodean. Estas regiones que reaccionan se ven en la microestructura como **figuras de corrosión**. La figura 4-11 muestra un esquema de los planos de deslizamiento, las dislocaciones y las figuras de corrosión. La figura 4-12 muestra una distribución de figuras de corrosión en la superficie de un cristal de carburo de silicio (SiC). También se usa el microscopio electrónico de transmisión (TEM, por sus siglas en inglés), descrito en el capítulo 3, para observar las dislocaciones. En una imagen normal de TEM con aumentos muy grandes, las dislocaciones aparecen como líneas oscuras, como se muestra en las figuras 4-13(a). Cuando hay miles de dislocaciones que se mueven sobre la superficie de un cristal, producen las líneas visibles llamadas **líneas de deslizamiento** [Fig. 4-13(b)]. A un grupo de líneas de deslizamiento se le llama **banda de deslizamiento** [Fig. 4-13(c)].

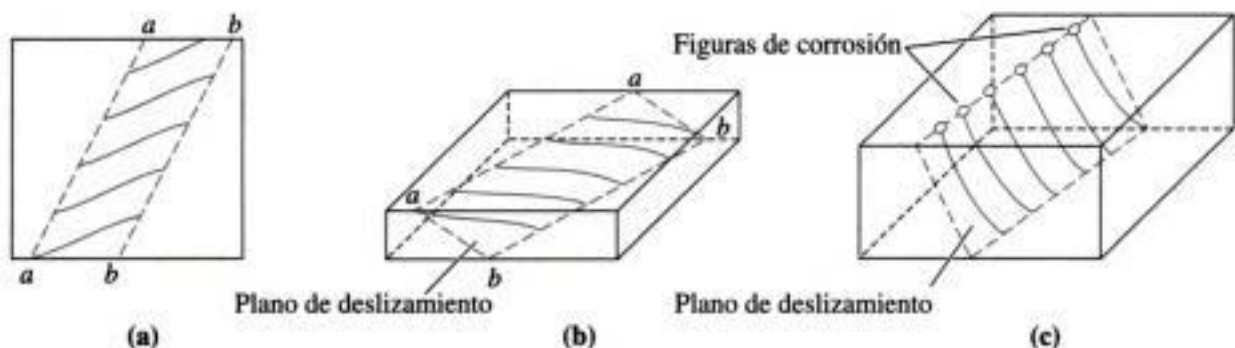


Figura 4-11 Esquema para ilustrar dislocaciones, planos de deslizamiento y lugares de figuras de corrosión. (Fuente: Adaptado de *Physical Metallurgy Principles*, 3a. ed., por R.E. Reed-Hill y R. Abbaschian, p. 92, figuras 4-7 y 4-8. Copyright © 1992 Brooks/Cole Thomson Learning. Adaptado con autorización.)

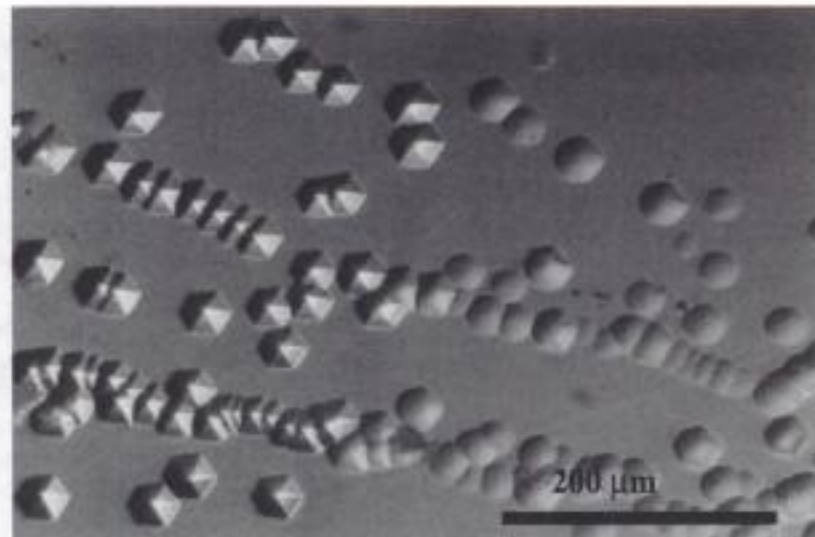
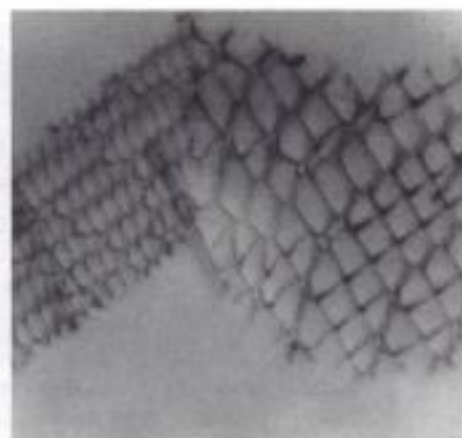


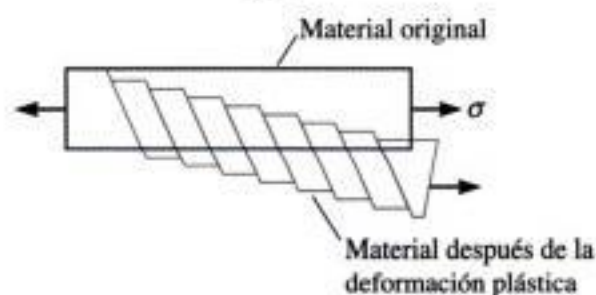
Figura 4-12 Imagen óptica figuras de corrosión en carburo de silicio (SiC). Las figuras de corrosión corresponden a puntos de intersección de dislocaciones puras de borde con vector de Burgers $\frac{a}{3} \langle 1\bar{1}20 \rangle$ y la línea de dislocación a lo largo de $[0001]$ (perpendicular a la superficie atacada). Las líneas de figuras de corrosión representan límites de grano con ángulo pequeño. (Cortesía del Dr. Marek Skowronski, Carnegie Mellon University.)



(a)



(b)



(c)

Figura 4-13 Fotomicrografías electrónicas de dislocaciones en Ti_3Al : (a) apilamientos de dislocaciones ($36\,500\times$). (b) Micrografía a $100\times$ que muestra las líneas de deslizamiento y los límites de grano en el Al. (c) Esquema del desarrollo de bandas de deslizamiento.

45

Importancia de las dislocaciones

En primer lugar, las dislocaciones tienen más importancia en los metales y las aleaciones porque proporcionan un mecanismo para la deformación plástica, mecanismo que es el efecto acumulado de numerosas dislocaciones. La **deformación plástica** es una deformación o cambio de forma irreversible que se presenta cuando se retira la fuerza o el esfuerzo que la causó. Esto se debe a que el esfuerzo aplicado causa el movimiento de dislocaciones, el cual, a su vez, causa la deformación permanente. El término "deformación plástica" significa que está causada por el movimiento de dislocaciones. Sin embargo, hay otros mecanismos que causan deformación permanente; los describiremos en capítulos posteriores. Se debe distinguir la deformación plástica de la **deformación elástica**, que es un cambio temporal de forma que sucede mientras una fuerza o un esfuerzo se aplica a un material. En la deformación elástica, el cambio de forma lo causa la elongación de los enlaces interatómicos; sin embargo, no hay movimiento de dislocaciones. El deslizamiento se puede presentar en algunos cerámicos y algunos polímeros. Sin embargo, hay otros factores (por ejemplo, porosidad de los cerámicos o enredo de cadenas en los polímeros, etc.) que dominan en el comportamiento mecánico de polímeros y cerámicos. Los materiales amorfos, como los vidrios de silicato, no tienen un arreglo periódico de iones y, por consiguiente, no contienen dislocaciones. *En consecuencia, el proceso de deslizamiento tiene especial importancia para comprender el comportamiento mecánico de los metales.* En primer lugar, el deslizamiento explica por qué la resistencia de los metales es mucho menor que el valor deducido a partir del enlace metálico. Si se presenta el deslizamiento, solamente se necesita romper una fracción diminuta de todos los enlaces metálicos a través de la interfaz en cualquier momento, y la fuerza que se requiere para deformar al metal es pequeña. Se puede demostrar que la resistencia real de los metales es de 10^3 a 10^4 veces menor que la esperada a partir de la resistencia de los enlaces atómicos.[10]

En segundo lugar, el deslizamiento proporciona ductilidad a los metales. Si no hubiera dislocaciones, una barra de hierro sería frágil y los metales no se podrían moldear en formas útiles con los procesos de trabajo propios de ellos, como la forja, por ejemplo.

En tercer lugar, se controlan las propiedades de un metal o una aleación interfiriendo con el movimiento de las dislocaciones. Un obstáculo introducido en el cristal evita que una dislocación se deslice, a menos que se apliquen fuerzas mayores. Así, la presencia de dislocaciones ayuda a endurecer los materiales metálicos.

En los materiales se encuentran cantidades enormes de dislocaciones. La **densidad de dislocaciones** o longitud total de dislocaciones por unidad de volumen es lo que suele usarse para representar la cantidad de dislocaciones presentes. Las densidades de dislocación de 10^6 cm/cm³ son normales en los metales más suaves, mientras que al deformar el material se pueden alcanzar densidades hasta de 10^{12} cm/cm³.

Las dislocaciones también influyen sobre las propiedades electrónicas y ópticas de los materiales.[9] Por ejemplo, la resistencia del cobre puro aumenta al aumentar la densidad de dislocaciones. Antes habíamos mencionado que la resistividad del cobre puro depende mucho de pequeñas concentraciones de impurezas. De igual forma, la velocidad con la que los portadores de carga, como los electrones, pueden moverse en el silicio depende de la densidad de dislocaciones. Es preferible usar cristales de silicio donde esencialmente no hay dislocaciones, porque esto permite el movimiento más rápido de los portadores de carga, como son los electrones. Normalmente, la presencia de dislocaciones tiene un efecto perjudicial sobre la eficiencia de los fotodetectores, los diodos emisores de luz, los láseres y las celdas solares.[11] Frecuentemente, estos dispositivos se fabrican con semiconductores compuestos, como el arseniuro de galio-arseniuro de aluminio (GaAs-AlAs), y las dislocaciones en estos materiales pueden deberse a desigualdades de concentración en el fundido donde crecen estos cristales o a esfuerzos inducidos por gradientes térmicos a los que están expuestos los cristales durante su enfriamiento desde la temperatura de crecimiento.[12]

Las diferencias de comportamiento en los metales con distintas estructuras pueden comprenderse examinando la fuerza necesaria para iniciar el proceso de deslizamiento. Supongamos que se aplica una fuerza F unidireccional a un cilindro de metal formado por un monocristal (Fig. 4-14). El plano de deslizamiento y la dirección de deslizamiento se pueden orientar respecto a la fuerza aplicada definiendo los ángulos λ y ϕ . El ángulo entre la dirección de deslizamiento y la fuerza aplicada es λ , y ϕ es el ángulo entre la normal al plano de deslizamiento y la fuerza aplicada. Obsérvese que la suma de los ángulos ϕ y λ puede ser 90° , pero no en forma obligatoria.

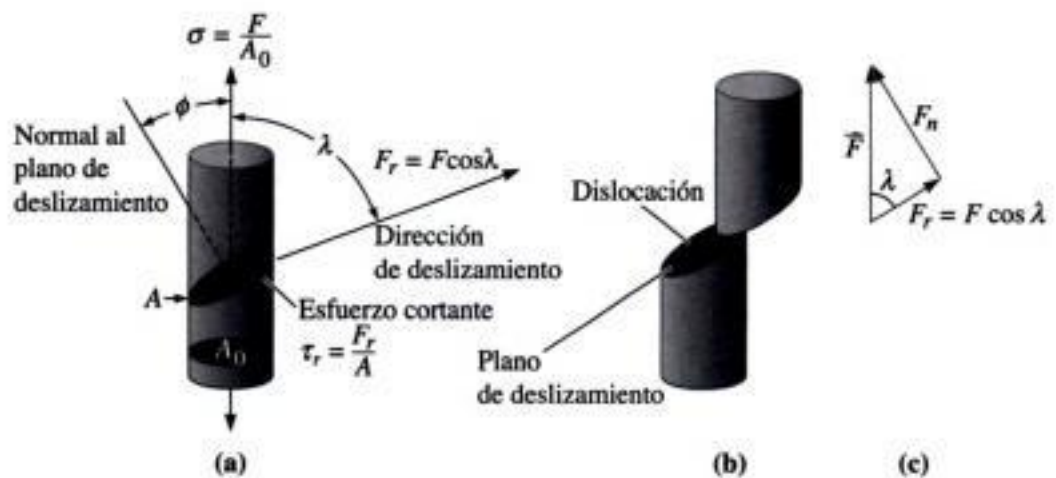


Figura 4-14 (a) En un sistema de deslizamiento se produce un esfuerzo cortante resuelto τ_r . (Nota: $\phi + \lambda$ no tiene por qué ser 90° .) (b) El movimiento de dislocaciones en el sistema de deslizamiento deforma el material. (c) Resolución (descomposición) de la fuerza.

Para que la dislocación se mueva en este sistema de deslizamiento, la fuerza aplicada debe producir una fuerza cortante que actúe en la dirección de deslizamiento. Esta fuerza cortante resuelta F_r es:

$$F_r = F \cos \lambda$$

Si dividimos la ecuación entre el área del plano de deslizamiento, $A = A_0 / \cos \phi$, obtenemos la siguiente ecuación, llamada **ley de Schmid**:

$$\tau_r = \sigma \cos \phi \cos \lambda, \quad (4-3)$$

donde:

$$\tau_r = \frac{F_r}{A} = \text{esfuerzo cortante resuelto en la dirección de deslizamiento}$$

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \text{esfuerzo unidireccional aplicado al cilindro}$$

EJEMPLO 4-10 *Cálculo del esfuerzo cortante resuelto*

Aplique la ley de Schmid para un caso en el cual el monocristal tiene una orientación tal que el plano de deslizamiento es perpendicular al esfuerzo de tensión aplicado.

SOLUCIÓN

Supongamos que el plano de deslizamiento es perpendicular al esfuerzo σ aplicado, como en la figura 4-15. Entonces $\phi = 0^\circ$, $\lambda = 90^\circ$, $\cos \lambda = 0$ y, en consecuencia, $\tau_r = 0$. Como se vio antes, los ángulos ϕ y λ pueden sumar 90° , aunque no siempre lo hacen. Aun cuando sea enorme el esfuerzo σ aplicado, no se desarrolla esfuerzo cortante resuelto a lo largo de la dirección de deslizamiento, y no se puede mover la dislocación. (El lector puede hacer un experimento sencillo para demostrarlo, con un mazo de baraja. Si se empuja en ángulo, las cartas se deslizan una sobre otra, como en el proceso de deslizamiento. Sin embargo, si se empuja perpendicular al mazo, las cartas no se deslizan.) No puede haber deslizamiento si el sistema de deslizamiento se orienta de tal modo que λ o ϕ sean 90° .

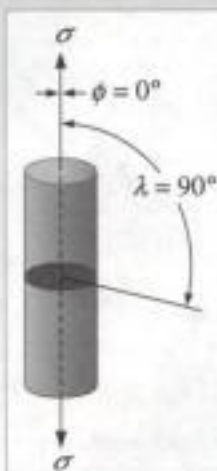


Figura 4-15

Cuando el plano de deslizamiento es perpendicular al esfuerzo aplicado σ , el ángulo λ es 90° y no se resuelve esfuerzo cortante.

El **esfuerzo cortante crítico resuelto**, τ_{crss} , es el que se requiere para romper suficiente cantidad de enlaces metálicos para que suceda el deslizamiento. Así, el deslizamiento se presenta cuando el **esfuerzo aplicado** (σ) produce un **esfuerzo cortante resuelto** (τ_r) que es igual al **esfuerzo cortante crítico resuelto** y hace que el metal se deforme plásticamente.

$$\tau_r = \tau_{crss} \quad (4-4)$$

EJEMPLO 4-11 *Diseño de un proceso de crecimiento de un monocristal*

Deseamos producir una barra de monocristal de aluminio puro, el cual tiene un esfuerzo cortante crítico resuelto de 148 psi. Desearíamos que la barra esté orientada de tal modo que cuando se le aplique un esfuerzo axial de 500 psi, se deforme por deslizamiento a 45° respecto a su eje y actúe sobre un sensor que detecte la sobrecarga. Diseñe la barra y un método para poder producirla.

SOLUCIÓN

Las dislocaciones comienzan a moverse cuando el esfuerzo cortante resuelto τ_r es igual al esfuerzo cortante crítico resuelto, 148 psi. De acuerdo con la ley de Schmid:

$$\tau_r = \sigma \cos \lambda \cos \phi, \text{ o}$$

$$148 \text{ psi} = (500 \text{ psi}) \cos \lambda \cos \phi$$

Como deseamos que haya deslizamiento en un ángulo de 45° respecto al eje de la barra, $\lambda = 45^\circ$, y

$$\cos \phi = \frac{148}{500 \cos 45} = \frac{148}{(500)(0.707)} = 0.419$$

$$\phi = 65.2^\circ$$

En consecuencia, debemos producir una barra orientada de tal modo que $\lambda = 45^\circ$ y que $\phi = 65.2^\circ$. Obsérvese que ϕ y λ no suman 90° .

Podríamos hacerlo con un proceso de solidificación. Se orientaría un cristal semilla de aluminio sólido en el fondo del molde. En el molde, se podría introducir aluminio líquido. El líquido comienza a solidificarse a partir del cristal inicial, y se produce una barra de monocristal con la orientación adecuada.

47

Influencia de la estructura cristalina

La ley de Schmid se puede usar para comparar las propiedades de metales que tengan estructuras cristalinas BCC, FCC y HCP. La tabla 4-2 es una lista de tres factores importantes que se pueden examinar. Sin embargo, se debe tener en cuenta que esta descripción es del comportamiento de monocristales casi perfectos. Los materiales diseñados en realidad casi nunca son monocristales y siempre contienen grandes cantidades de defectos; también tienden a ser policristalinos. Como los distintos cristales o granos están orientados en direcciones aleatorias, no se puede aplicar la ley de Schmid para pronosticar el comportamiento mecánico de los materiales policristalinos.

TABLA 4-2 ■ Resumen de los factores que afectan el deslizamiento en las estructuras metálicas

Factor	FCC	BCC	HCP $\left(\frac{c}{a} > 1.633\right)$
Esfuerzo cortante crítico resuelto (psi)	50-100	5 000-10 000	50-100 ^a
Cantidad de sistemas de deslizamiento	12	48	3 ^b
Deslizamiento cruzado	Puede ocurrir	Puede ocurrir	No puede ocurrir ^b
Resumen de propiedades	Dúctil	Resistente	Relativamente frágil

^aPara deslizamiento en planos basales.

^bAleando o calentando a temperaturas elevadas hay sistemas adicionales de deslizamiento en los metales HCP que permiten el deslizamiento cruzado y con ello mejoran la ductilidad.

Esfuerzo cortante crítico resuelto Si el esfuerzo cortante crítico resuelto en un metal es muy alto, el esfuerzo aplicado σ también debe ser alto para que τ_r sea igual a τ_{crss} . Un mayor τ_{crss} implica que es necesario mayor esfuerzo para deformar un metal, lo que a su vez indica que ¡el metal tiene alta resistencia! En los metales FCC, que tienen planos {111} de empaquetamiento

compacto, el esfuerzo cortante crítico resuelto es bajo, de unas 50 a 100 psi en un cristal perfecto; los metales FCC tienden a las bajas resistencias. Por otra parte, las estructuras BCC no contienen planos de empaquetamiento compacto, y se debe rebasar un esfuerzo cortante crítico resuelto mayor, del orden de 10 000 psi en los cristales perfectos, para que suceda el deslizamiento. En consecuencia, los metales BCC tienden a las altas resistencias y bajas ductilidades.

Cabría esperar que los metales HCP, ya que contienen planos basales de empaquetamiento compacto, tuvieran bajos esfuerzos cortantes críticos resueltos. De hecho, en metales HCP como el zinc, que tienen una relación c/a mayor o igual que la relación teórica de 1.633, el esfuerzo cortante crítico resuelto es menor que 100 psi, como en los metales FCC. Sin embargo, en el titanio HCP la relación c/a es menor que 1.633; los planos de empaquetamiento compacto están muy juntos entre sí. Entonces se presenta deslizamiento en planos como el (1010), los planos o caras "prismáticos" del hexágono, y entonces el esfuerzo cortante crítico resuelto es igual o mayor que en los metales BCC.

Cantidad de sistemas de deslizamiento Si al menos un sistema de deslizamiento se orienta con los ángulos λ y ϕ cercanos a 45° , entonces τ_r es igual a τ_{crs} con bajos esfuerzos aplicados. Los metales HCP ideales sólo poseen un conjunto de planos paralelos con empaquetamiento compacto, los planos (0001), y tres direcciones de empaquetamiento compacto, lo que resulta en un total de tres sistemas de deslizamiento. En consecuencia, es muy baja la probabilidad de que los planos y las direcciones de empaquetamiento compacto se orienten con λ y ϕ cercanos a 45° . Los cristales HCP pueden fallar de una manera frágil sin una cantidad significativa de deslizamiento. Sin embargo, en los metales HCP con baja relación c/a , o cuando los metales HCP forman aleaciones adecuadas, o cuando se aumenta la temperatura, se activan otros sistemas de deslizamiento y estos metales se vuelven menos frágiles de lo que cabría esperar.

Por otra parte, los metales FCC contienen cuatro planos no paralelos de empaquetamiento compacto, de la forma {111}, y tres direcciones de empaquetamiento compacto de la forma $\langle 110 \rangle$ dentro de cada plano; es decir, un total de 12 sistemas de deslizamiento. Al menos un sistema de deslizamiento está orientado en forma adecuada para que haya deslizamiento con pequeños esfuerzos aplicados, y los metales FCC tienen ductilidades elevadas.

Por último, los metales BCC tienen hasta 48 sistemas de deslizamiento que tienen casi un empaquetamiento compacto. Siempre hay varios sistemas de deslizamiento con la orientación adecuada para que haya deslizamiento; esto permite que los metales BCC también tengan gran ductilidad.

Deslizamiento cruzado Imaginemos una dislocación de tornillo que se mueve sobre un plano de deslizamiento y encuentra un obstáculo que bloquea totalmente su movimiento. Esta dislocación puede trasladarse a un segundo sistema de deslizamiento que lo interseca, si también tiene la orientación adecuada y continúa moviéndose. A esto se le llama **deslizamiento cruzado**. En muchos metales HCP, no puede haber deslizamiento cruzado, porque los planos de deslizamiento son paralelos; es decir, no se cruzan. En consecuencia, los metales HCP policristalinos tienden a ser frágiles. Por fortuna, se activan otros sistemas de deslizamiento cuando se alean o se calientan los metales HCP, con lo que mejora su ductilidad. Es posible el deslizamiento cruzado en los metales FCC y en los BCC, porque hay varios sistemas de deslizamiento que se cruzan. En consecuencia, el deslizamiento cruzado ayuda a mantener la ductilidad en esos metales.

EJEMPLO 4-12 Ductilidad de monocristales de metales HCP y de materiales policristalinos

Un monocristal de magnesio (Mg), que tiene estructura cristalina HCP, se puede estirar en forma de cinta hasta de cuatro a seis veces su longitud original. Sin embargo, el Mg y otros metales con estructura HCP en estado *policristalino* muestran ductilidades limitadas. Use los valores de esfuerzo cortante crítico resuelto para los metales con distintas estructuras cristalinas, así como la naturaleza de la deformación de materiales policristalinos, para explicar esta observación.

SOLUCIÓN

En la tabla 4-2 se observa que, para los metales HCP como el Mg, el esfuerzo cortante crítico resuelto es bajo (de 50 a 100 psi). También se observa que el deslizamiento sucede con facilidad en los metales HCP en el plano basal, el plano primario de deslizamiento. Cuando se deforma un monocristal, suponiendo que el plano basal tenga la orientación adecuada respecto al esfuerzo aplicado, puede producirse una deformación muy grande. Esto explica por qué el monocristal de Mg puede estirarse y formar una cinta de cuatro a seis veces la longitud original. Cuando está presente Mg policristalino, la deformación no es tan sencilla. Cada cristal debe deformarse de tal modo que la deformación unitaria que se desarrolle en cualquier cristal quepa entre sus cristales vecinos. En los metales HCP no hay planos cruzados de deslizamiento, y entonces las dislocaciones no pueden propagarse de un plano de deslizamiento en un cristal (grano) a otro plano de deslizamiento en un cristal vecino. El resultado es que los metales policristalinos como el Mg muestran ductilidad limitada.

4-8

Defectos superficiales

Los defectos superficiales son los límites o los planos que separan un material en regiones; cada región tiene la misma estructura cristalina, pero distinta orientación.

Superficie del material Las dimensiones exteriores del material representan superficies en donde termina el cristal en forma súbita. Cada átomo en la superficie ya no tiene el número adecuado de coordinación y se interrumpe el enlazamiento atómico. Con bastante frecuencia, esto es un factor muy importante en la fabricación de dispositivos microelectrónicos a base de Si. La superficie exterior también puede ser muy áspera, contener muescas diminutas y ser mucho más reactiva que el interior del material.

En los materiales con nanoestructura, la relación de la cantidad de átomos o iones en la superficie con los del interior es muy alta. En consecuencia, esos materiales tienen una superficie grande por unidad de masa. En la refinación del petróleo y en muchas otras áreas de la tecnología se usan catalizadores con área superficial muy alta para impulsar la cinética de las reacciones químicas. De manera parecida a los materiales de nanoescala, los materiales porosos, los geles y los polvos ultrafinos son ejemplos de materiales cuya superficie es muy grande. El lector verá más adelante que la reducción de la superficie es la fuerza termodinámica motriz para sinterizar los polvos de cerámica y de metales.

Límites de grano La microestructura de muchos materiales cerámicos y metálicos consiste en muchos granos. Un **grano** es una porción del material dentro de la cual el arreglo de los átomos es casi idéntico. Sin embargo, la orientación del arreglo de átomos, o estructura cristalina, es distinta en cada grano vecino. En la figura 4-16(a) se muestra el esquema de tres granos; el arreglo de los átomos en cada grano es idéntico, pero los granos tienen distinta orientación. Un **límite de grano**, la superficie que separa los granos individuales, es una zona angosta donde los átomos no tienen las distancias correctas. Es decir, los átomos están tan próximos entre sí en algunos lugares del límite del grano, que producen una zona de compresión; y en otras áreas están tan alejados, que producen una zona de tensión. La figura 4-16(b) es una micrografía de una muestra de acero inoxidable.

Un método para controlar las propiedades de un material es controlar el tamaño del grano. Al reducir el tamaño del grano, se aumenta la cantidad de granos y, en consecuencia, se aumenta la cantidad de superficie de límites de grano. Toda dislocación recorre solamente una distancia corta para encontrar un límite de grano y detenerse; así, la resistencia del material metálico aumenta. La **ecuación de Hall-Petch** relaciona el tamaño del grano con la **resistencia de cedencia**,

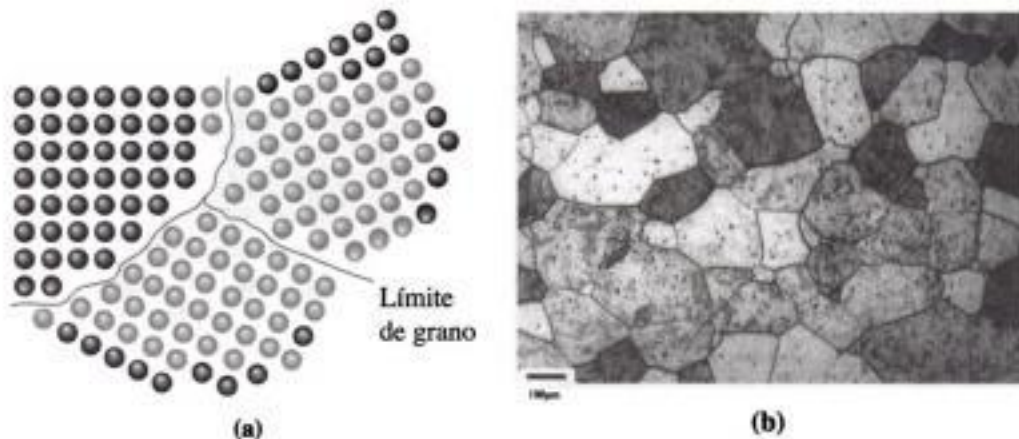


Figura 4-16 (a) Los átomos cercanos a los límites de los tres granos no tienen una distancia o un arreglo en equilibrio. (b) Granos y límites de grano en una muestra de acero inoxidable. (Cortesía del Dr. A. Deardo.)

$$\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-1/2}, \quad (4-5)$$

donde σ_y es la resistencia de cedencia, punto de fluencia, punto de cedencia o límite elástico, que es el valor necesario del esfuerzo para causar cierta cantidad de deformación permanente; d es el diámetro promedio de los granos y σ_0 y K son constantes para el metal. Recuerdese que en el capítulo 1 se dijo que la resistencia de cedencia de un material metálico es el valor mínimo del esfuerzo necesario para iniciar la deformación plástica o permanente. La figura 4-17 muestra esta relación en el acero. La ecuación de Hall-Petch no es válida en materiales con granos excepcionalmente grandes, o con granos ultrafinos. En los siguientes capítulos describiremos la forma en que se puede controlar el tamaño de grano de metales y aleaciones por solidificación, aleación y tratamiento térmico.

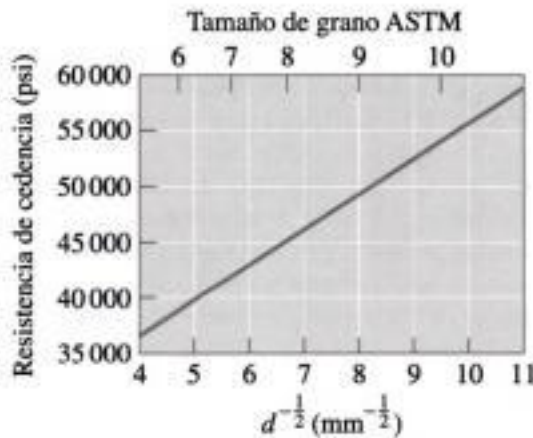


Figura 4-17 Efecto del tamaño de grano sobre la resistencia de cedencia de un acero a temperatura ambiente.

EJEMPLO 4-13

Diseño de un acero suave

La resistencia de cedencia de un acero suave (o dulce) con tamaño promedio de grano de 0.05 mm es 20 000 psi. El esfuerzo de cedencia del mismo acero con un tamaño de grano de 0.007 mm es 40 000 psi. ¿Cuál será el tamaño promedio de grano del mismo acero, para que tenga un esfuerzo de cedencia de 30 000 psi? Suponga que la ecuación de Hall-Petch es válida y que los cambios que se observan en el esfuerzo de cedencia se deben a cambios de tamaño del grano.

SOLUCIÓN

$$\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-1/2},$$

Así, para un tamaño de grano de 0.05 mm, la resistencia de cedencia es

$$20 \times 6.895 \text{ MPa} = 137.9 \text{ MPa}$$

(Nota: 1000 psi = 6.895 MPa.) Mediante la ecuación de Hall-Petch:

$$137.9 = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{0.05}}$$

Para el tamaño de grano de 0.007 mm, la resistencia de cedencia es $40 \times 6.895 \text{ MPa} = 275.8 \text{ MPa}$. En consecuencia, al aplicar de nuevo la ecuación de Hall-Petch:

$$275.8 = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{0.007}}$$

Al resolver estas dos ecuaciones $K = 18.43 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{-1/2}$, y $\sigma_0 = 55.5 \text{ MPa}$. Ahora, la ecuación de Hall-Petch es

$$\sigma_y = 55.5 + 18.43 \times d^{-1/2}$$

Si deseamos una resistencia de cedencia de 30 000 psi o $30 \times 6.895 = 206.9 \text{ MPa}$, el tamaño de grano será 0.0148 mm.

La *microscopía óptica* es una técnica que se usa para revelar las propiedades microestructurales, como límites de grano, donde se requiere un aumento aproximado menor que 2000. El proceso de preparar una muestra de metal y observar su microestructura se llama **metalografía**. Se corta, lija y pule una muestra hasta que tenga un acabado de espejo. A continuación, la superficie se expone al *ataque* químico, y los límites de grano se atacan en forma más intensa que el resto del grano. La luz de un microscopio óptico se refleja o se dispersa en la superficie de la muestra, dependiendo de la forma en que esté atacada la superficie. Cuando es mucha la luz que se dispersa en entidades donde el ataque es más profundo,

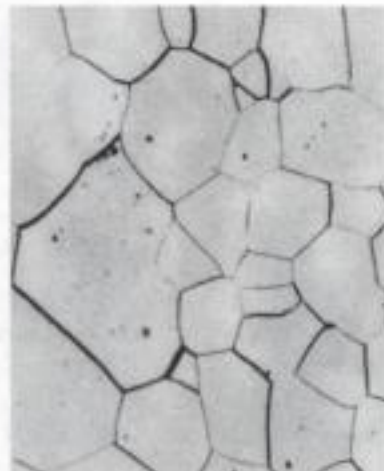


Figura 4-18
Microestructura del paladio (100×). (De ASM Handbook, vol. 9, *Metallography and Microstructure* (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073.)

como los límites de grano, esas entidades aparecen negras (Fig. 4-18). En las muestras cerámicas, se usa con frecuencia una técnica llamada **ataque térmico** para observar los límites de grano. Implica pulir y calentar durante corto tiempo un cerámico a temperaturas inferiores a la de sinterización.

Una forma de especificar el tamaño de grano es con el **número de tamaño de grano ASTM** (ASTM, *American Society for Testing and Materials*). La cantidad de granos por pulgada cuadrada se determina con una fotografía del metal, tomada con $100\times$ de aumento. La cantidad N de granos por pulgada cuadrada se sustituye en la ecuación 4-6, y se calcula el número n de tamaño de grano ASTM:

$$N = 2^{n-1} \quad (4-6)$$

Un número ASTM grande indica muchos granos, o un tamaño pequeño de partícula, y se correlaciona con mayores resistencias en los metales.

Al describir una microestructura, siempre que sea posible, se prefiere usar un marcador micrométrico o alguna otra escala sobre la micrografía, en lugar de especificar el aumento como X , como en la figura 4-25. De ese modo, si la micrografía se amplifica o se reduce y el marcador micrométrico crece o se contrae, sin tener que ocuparse por los cambios de aumento respecto a la micrografía original. Hay varios programas sofisticados de **análisis de imágenes** que se consiguen en Internet. Al usarlos, es posible no sólo obtener información sobre el número ASTM de tamaño de grano, sino también información cuantitativa sobre tamaño aproximado de grano, distribución de tamaños de grano, porosidad, segundas fases (capítulo 9), etc. Se pueden comprar diversos microscopios ópticos y electrónicos de barrido con funciones de análisis de imágenes, o bien las imágenes se pueden procesar con programas de análisis de imágenes. El siguiente ejemplo ilustra el cálculo del número ASTM de tamaño de grano.

EJEMPLO 4-14 Cálculo del número ASTM de tamaño de grano

Contamos 16 granos por pulgada cuadrada en una fotomicrografía tomada con un aumento de $250\times$ (o 250 diámetros). ¿Cuál es el número ASTM de tamaño de grano?

SOLUCIÓN

Si contamos 16 granos por pulgada cuadrada $250\times$ de aumento, entonces, con un aumento de $100\times$, debemos tener:

$$N = \left(\frac{250}{100}\right)^2 (16) = 100 \text{ granos/pulg}^2 = 2^{n-1}$$

$$\log 100 = (n - 1) \log 2$$

$$2 = (n - 1) (0.301)$$

$$n = 7.64$$

Límites de grano de ángulo pequeño Un **límite de grano de ángulo pequeño** es un conjunto de dislocaciones que produce una pequeña desorientación entre cristales vecinos (Fig. 4-19). Como la energía de la superficie es menor que la de un límite de grano normal, los límites de grano con ángulo pequeño no son tan eficientes para bloquear los deslizamientos. Los límites de grano con tamaño pequeño que se forman por dislocaciones de borde se

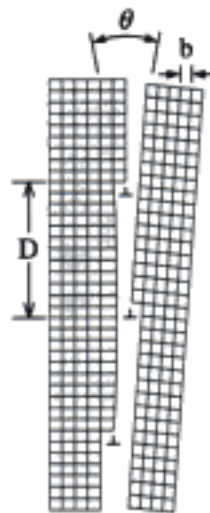


Figura 4-19

El límite de grano con ángulo pequeño se produce con un conjunto de dislocaciones que causa un desalineamiento angular θ entre las redes cristalinas a ambos lados del límite.

llaman **límites inclinados**; los que se forman por dislocaciones de tornillo se llaman **límites de giro**.

Fallas de apilamiento Las **fallas de apilamiento**, que se presentan en los metales FCC, representan un error en la secuencia de apilamiento de los planos con empaquetamiento compacto. Normalmente, se produce una secuencia de *ABC ABC* en un cristal perfecto. Pero supóngase que se produce la siguiente secuencia:



En la porción de la secuencia indicada, un plano tipo A ocupa el lugar donde un plano tipo C estaría localizado normalmente. Esta pequeña región, que tiene una secuencia de apilamiento HCP en lugar de la FCC, representa una falla de apilamiento. Las fallas de apilamiento interfieren con el proceso de deslizamiento.

Límites de macla Un **límite de macla** (o de gemelación) es un plano a través del cual hay una desorientación especial de imagen especular de la estructura cristalina (Fig. 4-20). Las maclas pueden producirse cuando una fuerza cortante, que actúa a lo largo del límite de macla, hace que los átomos se desplacen de su posición. El maclado sucede durante la deformación o el tratamiento térmico de ciertos metales. Los límites de macla interfieren con el proceso de deslizamiento y aumentan la resistencia del metal. El movimiento de los límites de macla también puede causar la deformación del metal. El maclado también se presenta en algunos materiales cerámicos, como la zirconia monoclinica y el silicato dicálcico.[12,13]

La eficiencia que tienen los defectos superficiales para interferir con el proceso de deslizamiento puede juzgarse mediante las energías de superficie (tabla 4-3). Los límites de grano con alta energía son mucho más eficientes para bloquear las dislocaciones que las fallas de apilamiento o los límites de macla.

Límites de dominio Los materiales **ferroeléctricos** son los que desarrollan polarización dieléctrica espontánea y reversible (por ejemplo, PZT o BaTiO_3 , capítulo 18). A los materiales que desarrollan una magnetización en forma parecida se les llama **ferromagnéticos** (por ejemplo Fe, Co, Ni) o **ferrimagnéticos** (por ejemplo Fe_3O_4 y otras ferritas magnéticas, capí-

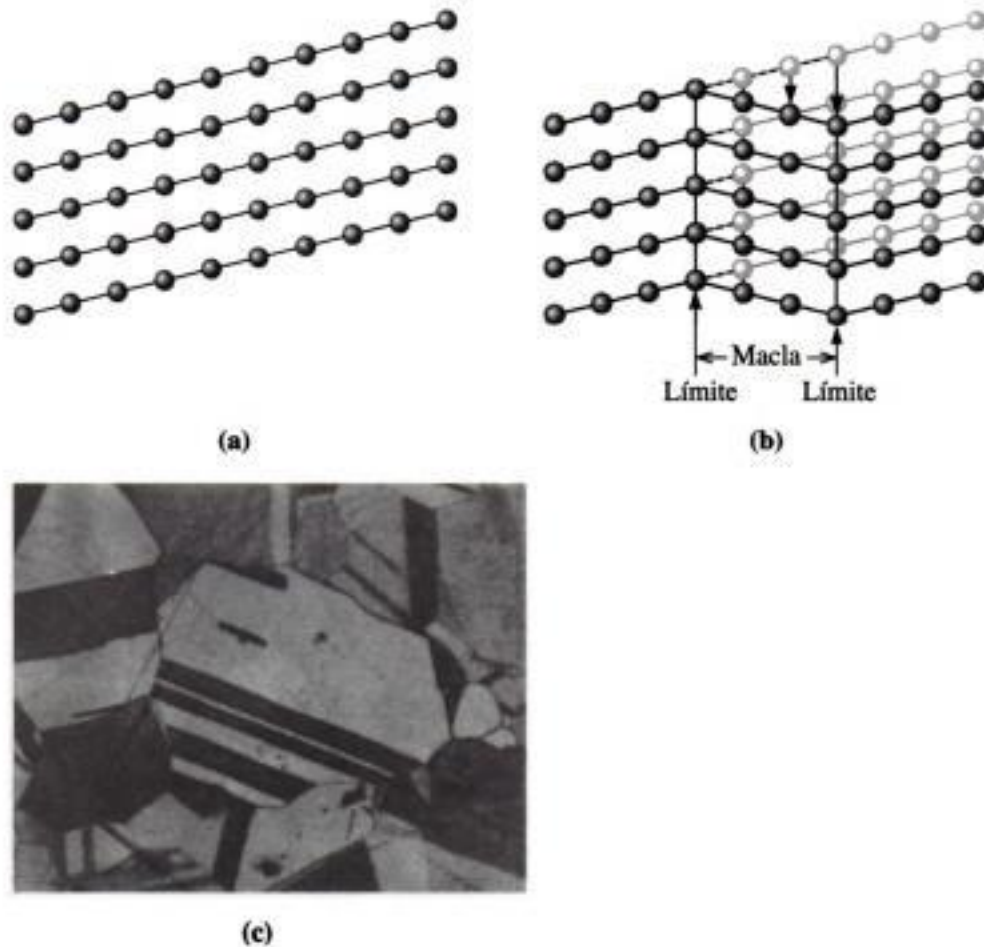


Figura 4-20 La aplicación de un esfuerzo a un cristal perfecto (a) puede causar un desplazamiento de los átomos, (b) causando la formación de una macla. Observe que el cristal se ha deformado como consecuencia del maclado. (c) Micrografía de maclas dentro de un grano de latón (250 $\times$).

TABLA 4-3 ■ Energías de defectos superficiales en algunos metales

Defecto superficial (energía/cm ²)	Al	Cu	Pt	Fe
Falla de apilamiento	200	75	95	—
Límite de macla	120	45	195	190
Límite de grano	625	645	1000	780

tulo 19). Estos materiales electrónicos y magnéticos contienen dominios. Un **dominio** es una pequeña región del material cuya dirección de magnetización o de polarización dieléctrica permanece igual. En esos materiales se forman muchos dominios pequeños de tal manera que se minimiza la energía libre total del material. La figura 4-21 muestra un ejemplo de dominios en el titanato de bario tetragonal ferroeléctrico. La presencia de dominios influye sobre las propiedades dieléctricas y magnéticas de muchos materiales electrónicos y magnéticos. En capítulos posteriores describiremos estos materiales.

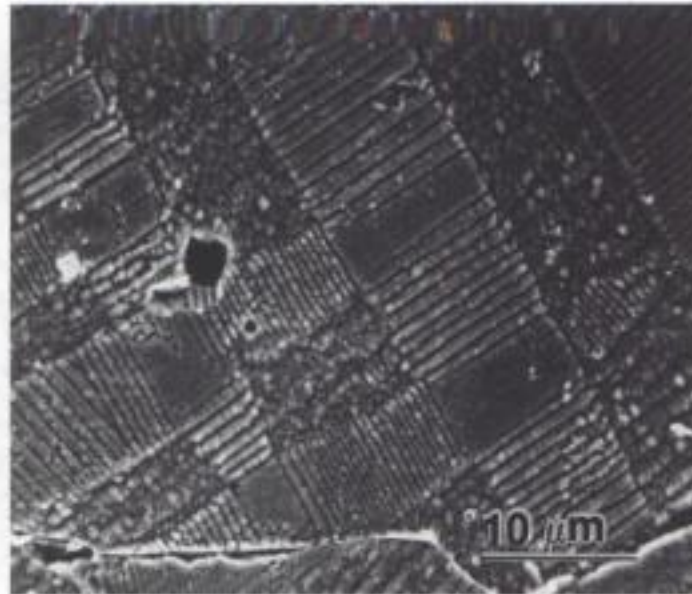


Figura 4-21 Dominios en titanato de bario ferroeléctrico. (Cortesía del Dr. Rodney Roseman, Universidad de Cincinnati.) En los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos se producen estructuras de dominio parecidas.

49

Importancia de los defectos

Los defectos extendidos y los puntuales desempeñan una función de la mayor importancia en la determinación de las propiedades mecánicas, eléctricas, ópticas y magnéticas de los materiales diseñados. En esta sección, recapitularemos acerca de la importancia de los defectos sobre las propiedades de los materiales. Insistiremos en que el efecto de las dislocaciones sólo tiene la máxima importancia en los materiales metálicos.

Efecto sobre las propiedades mecánicas a través del control del proceso de deslizamiento Toda imperfección en el cristal aumenta la energía interna en el lugar de la imperfección. La energía local aumenta porque, cerca de la imperfección, los átomos están muy comprimidos y cercanos entre sí (compresión) o muy apartados (tensión).

Una dislocación en un cristal metálico, que por lo demás sería perfecto, se puede mover con facilidad por el cristal si el esfuerzo cortante resuelto es igual al esfuerzo cortante crítico resuelto. Sin embargo, si la dislocación se encuentra con una región donde los átomos están desplazados respecto a sus posiciones normales, se requiere un esfuerzo mayor para forzar el paso de la dislocación por la región de alta energía local; en consecuencia, el material es más resistente. *En los materiales, los defectos como las dislocaciones, defectos puntuales y límites de grano sirven como "obstáculo" a las dislocaciones.* Es posible controlar la resistencia de un material metálico controlando la cantidad y el tipo de las imperfecciones. Hay tres mecanismos comunes de endurecimiento (o reforzamiento) que se basan en las tres categorías de defectos en los cristales. Como el movimiento de dislocaciones es relativamente más fácil en los metales y aleaciones, estos mecanismos suelen funcionar mejor en los materiales metálicos. Es necesario tener en cuenta que, con mucha frecuencia, la resistencia de los cerámicos a la tensión y a bajas temperaturas está determinada por la cantidad de porosidades (presencia de pequeños agujeros). Con frecuencia, los polímeros son amorfos y, por tanto, las dislocaciones desempeñan un papel muy pequeño en su comportamiento mecánico, como se describirá en un capítulo posterior. La resistencia de los vidrios inorgánicos (como el vidrio flotado de silicato) depende de la distribución de diminutas fallas sobre la superficie.

Endurecimiento por deformación Las dislocaciones interrumpen la perfección de la estructura cristalina. En la figura 4-22, los átomos abajo de la línea de dislocación en el punto *B* están comprimidos, mientras los de arriba de *B* están muy alejados. Si la dislocación *A* se mueve hacia la derecha y pasa cerca de la dislocación *B*, la dislocación *A* se encuentra con una región donde los átomos no tienen un orden adecuado. Se requieren mayores esfuerzos para mantener en movimiento la segunda dislocación; en consecuencia, el metal debe ser más resistente. Al aumentar la cantidad de dislocaciones, sigue aumentando la resistencia del material, porque al aumentar la densidad de las dislocaciones se producen más obstáculos al movimiento de las dislocaciones. Se puede demostrar que la densidad de dislocaciones aumenta en forma notable a medida que se deforma un material. Este mecanismo de aumentar la resistencia de un material por medio de la deformación se llama **endurecimiento por deformación** (o endurecimiento por trabajo en frío), que se describirá formalmente en el capítulo 7. También podemos demostrar que es posible reducir la densidad de dislocaciones, en forma apreciable, calentando un material a una temperatura relativamente alta y manteniéndolo en ella durante largo tiempo. A este tratamiento se le llama **recocido** y se usa para impartir ductilidad a los materiales metálicos. Por lo anterior, el control de la densidad de dislocaciones es un método importante para controlar la resistencia y la ductilidad de los metales y las aleaciones.

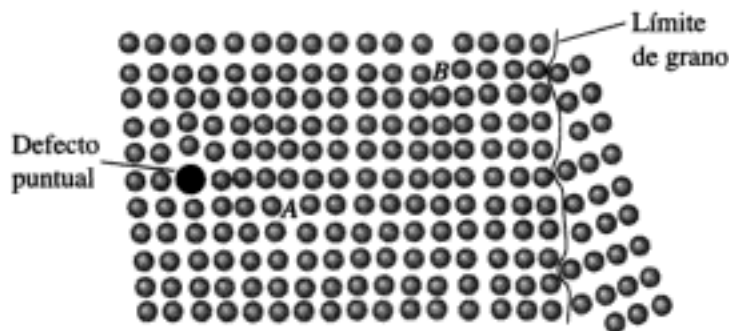


Figura 4-22 Si la dislocación en el punto *A* se mueve hacia la izquierda, queda bloqueada por el defecto puntual. Si la dislocación se mueve hacia la derecha, interactúa con la red perturbada cercana a la segunda dislocación en el punto *B*. Si la dislocación se mueve más hacia la derecha, queda bloqueada por un límite de grano.

Endurecimiento por solución sólida Cualquiera de los defectos puntuales también interrumpe la perfección de la estructura cristalina. Cuando la estructura cristalina del material anfitrión asimila por completo los átomos o los iones de un elemento o compuesto huésped, se forma una solución sólida. Esto ocurre de manera parecida a la forma en que la sal o el azúcar se disuelven en agua, en bajas concentraciones. Si una dislocación *A* se mueve hacia la izquierda (Fig. 4-22), se encuentra a un cristal perturbado debido al defecto puntual; son necesarios mayores esfuerzos para continuar el deslizamiento de la dislocación. Si en forma intencional se introducen átomos sustitucionales o intersticiales, se produce un **endurecimiento por solución sólida**, que se describirá en el capítulo 9. Este mecanismo explica por qué el acero simple al carbono es más resistente que el Fe puro, o por qué las aleaciones de cobre con pequeñas concentraciones de Be son mucho más resistentes que el Cu puro. El oro o la plata puros, que son metales FCC con muchos sistemas de deslizamiento activos, son demasiado suaves mecánicamente.

Endurecimiento por tamaño de grano Las imperfecciones de la superficie, tales como los límites de grano, perturban el arreglo de los átomos en los materiales cristalinos. Si la dislocación *B* se mueve hacia la derecha (Fig. 4-22), se encuentra con un límite de grano y queda bloqueada. Al aumentar la cantidad de granos, o reducir el tamaño de grano, se produce un **endurecimiento por tamaño de grano** en los materiales metálicos. El control del tamaño de grano se describirá en varios de los capítulos posteriores.

Hay otros dos mecanismos más para endurecer los metales y las aleaciones. Se conocen como **endurecimiento por segunda fase** y **endurecimiento por precipitación**. Se describirán en capítulos posteriores.

EJEMPLO 4-15 *Diseño y selección de materiales para una estructura estable*

Deseamos producir una ménsula para sujetar en su lugar ladrillos de cerámica en un horno de tratamiento térmico. La ménsula debe ser resistente, debe poseer algo de ductilidad para doblarse y no fracturarse si se sobrecarga, y deberá mantener la mayor parte de su resistencia hasta 600 °C. Diseñe el material para esta ménsula, teniendo en cuenta las distintas imperfecciones cristalinas como mecanismo de **endurecimiento**.

SOLUCIÓN

Para funcionar hasta 600 °C, la ménsula *no* se debe producir a partir de material polimérico; en cambio, se debe tener en cuenta un metal o un cerámico.

Para tener cierta ductilidad, las dislocaciones deben moverse y causar deslizamiento. Ya que el deslizamiento es difícil en los cerámicos, la ménsula debe fabricarse con un material metálico. El metal debe tener un punto de fusión bastante mayor que 600 °C; el aluminio no sería adecuado, porque su punto de fusión es 660 °C; sin embargo, el hierro sería una opción razonable.

En el hierro se pueden introducir defectos puntuales, de línea y de superficie, para ayudar a obtener resistencia, pero deseamos que las imperfecciones sean estables cuando aumente la temperatura de servicio. Como se verá en el capítulo 5, los granos pueden crecer a temperaturas elevadas, reduciendo la cantidad de límites de grano y causando una disminución de resistencia. Como se indicará en el capítulo 7, las dislocaciones se pueden eliminar a temperaturas elevadas, reduciendo de nuevo la resistencia. La cantidad de vacancias depende de la temperatura, por lo que el control de estos defectos cristalinos podrá no producir propiedades estables.

Sin embargo, la cantidad de átomos intersticiales o sustitucionales no cambia con la temperatura. Podríamos agregar carbono al hierro como átomos intersticiales, o sustituir átomos de hierro con átomos de vanadio en los puntos normales de red. Estos defectos puntuales continúan interfiriendo con el movimiento de las dislocaciones y contribuyen a mantener estable la resistencia.

Naturalmente, también puede haber otros requerimientos de diseño. Por ejemplo, la ménsula de acero se puede deteriorar por oxidación o puede reaccionar con el ladrillo de cerámica.

Efectos sobre las propiedades eléctricas, ópticas y magnéticas En las secciones anteriores describimos la profundidad del efecto de los defectos puntuales sobre las propiedades eléctricas de los semiconductores. Toda la industria de microelectrónica depende, en forma crítica, del éxito de incorporar dopantes sustitucionales como P, As, B y Al en el Si y en otros semiconductores. Estos átomos dopantes permiten ejercer un control apreciable sobre las propiedades eléctricas de los semiconductores. Los dispositivos fabricados con Si, GaAs, silicio amorfo (a:Si:H), etc., dependen en forma determinante de la presencia de átomos dopantes. Se puede obtener Si tipo n introduciendo átomos de P en el Si. Se puede preparar Si tipo p usando átomos de B. En forma parecida, varios enlaces, que de otro modo quedarían sin satisfacer en el silicio amorfo, se llenan incorporando átomos de H.

La influencia de defectos tales como dislocaciones sobre las propiedades de los semiconductores suele ser perjudicial. Las dislocaciones y otros defectos (incluyendo otros defectos puntuales) pueden interferir con el movimiento de portadores de cargas en semiconductores. Es la razón por la cual nos aseguramos de que sean muy pequeñas las densidades de dislocaciones en el silicio monocristalino y en otros materiales que se usan en aplicaciones ópticas y eléctricas. Los defectos puntuales también causan mayores valores de resistividad en los metales.

En algunos casos, los defectos pueden amplificar ciertas propiedades. Por ejemplo, al incorporar CaO en ZrO_2 se produce un aumento en la concentración de vacancias de iones oxígeno. Esto tiene un efecto benéfico sobre la conductividad de la zirconia y permite usar esas formulaciones en sensores de oxígeno gaseoso y en celdas de combustible de óxido sólido. Los defectos pueden convertir muchos materiales, que de otro modo serían aislantes, en semiconductores útiles! Estos semiconductores se usan en muchos sensores (por ejemplo, de temperatura, de humedad, de concentración de gases, etcétera).

Mediante la adición de aproximadamente 1% de óxido de cromo a la alúmina, se producen defectos que hacen rojo al rubí. De igual modo, al incorporar Fe^{+2} y Ti^{+4} a la alúmina, se forma el zafiro azul. Los nanocristales de materiales como sulfuro de cadmio (CdS) en vidrios inorgánicos producen cristales con colores brillantes. Los nanocristales de halogenuro de plata y otros más permiten la preparación de vidrios fotocrómicos y fotosensibles.

Muchos materiales magnéticos se pueden procesar de tal forma que los límites de grano y otros defectos hagan más difícil de invertir la magnetización en ellos. Las propiedades magnéticas de muchas ferritas comerciales que se usan en imanes para altoparlantes y dispositivos en redes de comunicación inalámbricas dependen en forma crítica de la distribución de iones diferentes en distintos sitios cristalográficos en la estructura cristalina. Como se mencionó antes, la presencia de dominios afecta las propiedades de los materiales ferroeléctricos, ferromagnéticos y ferrimagnéticos (capítulos 18 y 19).

RESUMEN

- Las imperfecciones o defectos en un material cristalino son de tres tipos generales: defectos puntuales, defectos lineales o dislocaciones y defectos superficiales.
- El término “defecto” es un tanto engañoso. Hay una cantidad incontable de tecnologías y aplicaciones que se basan en la utilidad de los defectos.
- La cantidad de vacancias depende de la temperatura del material; los átomos intersticiales (ubicados en sitios intersticiales entre los átomos normales) y los átomos sustitucionales (que reemplazan a los átomos anfitriones en los puntos de red) se introducen con frecuencia en forma deliberada y, normalmente, los cambios de temperatura no los afectan.
- Los defectos de Frenkel y de Schottky se ven comúnmente en materiales iónicos.
- Para describir la química de los defectos en los materiales, se usa la notación de Kröger-Vink. Estas reacciones se deben balancear en carga, masa y sitios cristalográficos usados.
- Las dislocaciones son defectos lineales que, cuando se aplica una fuerza a un material metálico, se mueven y deforman plásticamente ese material.
- El esfuerzo cortante crítico resuelto es el esfuerzo que se requiere para mover las dislocaciones.
- Las dislocaciones se mueven en un sistema de deslizamiento formado por un plano de deslizamiento y una dirección de deslizamiento. La dirección de deslizamiento, o vector de Burgers, suele ser de empaquetamiento compacto. El plano de deslizamiento también es, normalmente, de empaquetamiento compacto, o de empaquetamiento casi compacto.
- En los cristales metálicos, la cantidad y el tipo de direcciones de deslizamiento y de planos de deslizamiento influyen sobre las propiedades del metal. En los metales FCC, el esfuerzo

cortante crítico resuelto es bajo, y está disponible una cantidad óptima de planos de deslizamiento; en consecuencia, los metales FCC tienden a ser dúctiles. En los metales BCC, no hay planos de empaquetamiento compacto disponibles, y el esfuerzo cortante crítico resuelto es alto; en consecuencia, los metales BCC tienden a ser resistentes. La cantidad de sistemas de deslizamiento en los metales HCP es limitada y hace que esos metales se comporten en forma frágil.

- Los defectos puntuales, que incluyen vacancias, átomos intersticiales y átomos sustitucionales, introducen campos de deformación de compresión o de tensión tales que perturban los arreglos atómicos en el arreglo cristalino que los rodea. El resultado es que las dislocaciones no se pueden deslizar con facilidad en la cercanía de defectos puntuales, y la resistencia del material metálico aumenta.
- Entre los defectos superficiales están los límites de grano. Al producir un tamaño de grano muy pequeño, aumenta la cantidad de superficie de límite de grano; como las dislocaciones no pueden atravesar un límite de grano con facilidad, el material se endurece (ecuación de Hall-Petch).
- La cantidad y la clase de defectos cristalinos controla la facilidad de movimiento de las dislocaciones y, en consecuencia, influyen en forma directa sobre las propiedades mecánicas del material.
- El endurecimiento por deformación se obtiene al aumentar la cantidad de dislocaciones; el endurecimiento por solución sólida implica la introducción de defectos puntuales; y el endurecimiento por tamaño de grano se obtiene produciendo tamaños pequeños de grano.
- El recocido es un tratamiento térmico para contrarrestar los efectos del endurecimiento por deformación reduciendo la densidad de dislocaciones. Esto causa mayor ductilidad en los materiales metálicos.
- Los defectos en los materiales tienen una influencia apreciable sobre sus propiedades eléctricas, ópticas y magnéticas.

GLOSARIO

Análisis de imágenes Técnica para analizar imágenes de microestructuras y obtener información cuantitativa acerca del tamaño y forma de los granos, la distribución de los tamaños de grano, etcétera.

ASTM American Society for Testing and Materials.

Ataque térmico Técnica para observar microestructuras en materiales cerámicos. Implica el calentamiento, durante corto tiempo, de una muestra pulida hasta una temperatura un poco menor que la de sinterización.

Banda de deslizamiento Conjunto de muchas líneas de deslizamiento. Con frecuencia se ve con facilidad.

Defecto de Frenkel Par de defectos puntuales, producido cuando se mueve un ion para crear un sitio intersticial y deja atrás una vacancia.

Defecto de Schottky Defecto puntual en materiales con enlazamiento iónico. Para mantener una carga neutral, se debe formar la cantidad estequiométrica de vacancias de catión y de anión.

Defecto intersticial Defecto puntual que se produce cuando un átomo entra al cristal, en un sitio que normalmente no es un punto de red.

Defecto sustitucional Defecto puntual que se produce al quitar un átomo de un punto de red normal y sustituirlo por un átomo diferente, normalmente de tamaño distinto.

Defectos extendidos Defectos en los que toman parte varios átomos o iones y que, por consiguiente, se presentan en un volumen finito del material cristalino (por ejemplo, dislocaciones, fallas de apilamiento, etcétera).

Defectos lineales Defectos, como dislocaciones, en los que faltan átomos o iones en una fila.

Defectos puntuales Imperfecciones, como las vacancias, que normalmente están en un sitio (en algunos casos, en pocos sitios) en un cristal.

Defectos superficiales Imperfecciones, como límites de grano, que forman un plano bidimensional dentro del cristal.

Deformación elástica Deformación que desaparece totalmente cuando se elimina el esfuerzo que la produce.

Densidad de dislocaciones Longitud total de líneas de dislocación por centímetro cúbico en un material.

Deslizamiento Deformación de un material metálico causada por el movimiento de dislocaciones en el cristal.

Deslizamiento cruzado Cambio en el sistema de deslizamiento de una dislocación.

Dirección de deslizamiento Dirección en la que se mueve la dislocación en el cristal. La dirección de deslizamiento es igual que la dirección del vector de Burgers.

Dislocación Imperfección lineal en un material cristalino. El movimiento de las dislocaciones ayuda a explicar cómo se deforman los materiales metálicos. La interferencia con el movimiento de las dislocaciones ayuda a explicar cómo se endurecen los materiales metálicos.

Dislocación de borde o arista Dislocación que se introduce en el cristal agregando un "semiplano adicional" de átomos.

Dislocación de tornillo Dislocación producida torciendo un cristal, de tal modo que un plano atómico produce una rampa en espiral en torno a la dislocación.

Dislocación mixta Dislocación que contiene en parte componentes de borde y en parte componentes de tornillo.

Dominio Pequeña región de un material ferroeléctrico, ferromagnético o ferrimagnético, cuya dirección de polarización dieléctrica (o ferroeléctrica) o dirección de magnetización (materiales ferromagnéticos o ferrimagnéticos) permanece igual.

Dopantes Elementos o compuestos que se agregan intencionalmente, en concentraciones conocidas, y que aparecen en lugares específicos dentro de la microestructura, para mejorar las propiedades o el procesamiento de un material.

Ecuación de Hall-Petch Relación entre la resistencia de cedencia y el tamaño de grano en un material metálico: $\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$.

Endurecimiento por dispersión Mecanismo por el cual se introducen granos de un compuesto o segunda fase en los granos de un material metálico policristalino. Los cristales de la segunda fase funcionan como obstáculos a las dislocaciones, y con ello causan un aumento en la resistencia de un material metálico.

Endurecimiento por precipitación Endurecimiento de metales y aleaciones mediante la formación de precipitados diminutos dentro de los granos. Los pequeños precipitados contribuyen a resistir el movimiento de dislocaciones.

Endurecimiento por segunda fase Mecanismo por el cual se introducen granos de un compuesto o segunda fase en los granos de un material policristalino. Estos cristales de segunda fase funcionan como obstáculos a las dislocaciones y, con ello, causan un aumento en la resistencia de un material metálico.

Esfuerzo cortante crítico resuelto Esfuerzo cortante necesario para hacer que una dislocación se mueva y causar deslizamiento.

Esfuerzo de Peierls-Nabarro Esfuerzo cortante, el cual depende del vector de Burgers y de la distancia interplanar, necesario para hacer que se mueva una dislocación: $\tau = c \exp(-kd/b)$.

Falla de apilamiento Defecto superficial en metales FCC causado por una secuencia incorrecta de apilamiento de los planos de empaquetamiento compacto.

Ferrimagnético Material que también desarrolla magnetización espontánea y reversible (como el Fe_3O_4). Es distinto de un material ferromagnético, cuyos momentos magnéticos de los distintos iones no tienen la misma dirección.

Ferroeléctrico Material dieléctrico que desarrolla polarización eléctrica espontánea y reversible (por ejemplo, PZT, BaTiO_3).

Ferromagnético Material que desarrolla una magnetización espontánea y reversible (por ejemplo, Fe, Co, Ni).

Figuras de corrosión Pequeños agujeros que se crean en las áreas donde las dislocaciones tocan la superficie. Sirven para advertir la presencia de dislocaciones y examinar el número de las mismas.

Grano Uno de los cristales presentes en un material policristalino.

Impurezas Elementos o compuestos que llegan a un material; con frecuencia se originan en el procesamiento o en las materias primas, y en general tienen un efecto perjudicial sobre las propiedades o el procesamiento de un material.

Intersticialidad Defecto puntual causado cuando un átomo "normal" ocupa un sitio intersticial en el cristal.

Ley de Schmid Relación entre el esfuerzo cortante, el esfuerzo aplicado y la orientación del sistema de deslizamiento; esto es, $\tau = \sigma \cos \lambda \cos \phi$.

Límite de grano Defecto de la superficie que representa el límite entre dos granos. El cristal tiene orientación distinta a cada lado del límite de grano.

Límite de grano de ángulo pequeño Conjunto de dislocaciones que causa una pequeña desorientación en el cristal, a través de la superficie de la imperfección.

Límite de macla Defecto de superficie a través del cual hay una desorientación especular de la estructura cristalina. Los límites de macla también se pueden mover y causar deformación del material.

Límite de torcimiento Límite de grano de ángulo pequeño, formado por un conjunto de dislocaciones de tornillo.

Límite inclinado Límite de grano de ángulo pequeño, formado por un conjunto de dislocaciones de borde.

Límites de dominio Región entre los dominios en un material.

Líneas de deslizamiento Líneas visibles que se producen en la superficie de un material metálico, cuando hay miles de dislocaciones.

Metalografía Preparación de una muestra metálica de un material, mediante pulimento y ataque, para poder examinar la estructura en un microscopio.

Microscopio electrónico de transmisión (TEM, por sus siglas inglés) Instrumento que, al pasar un haz de electrones a través de un material, puede detectar propiedades estructurales microscópicas.

Notación de Kröger-Vink Sistema para indicar defectos puntuales en los materiales. El cuerpo principal de la notación indica el tipo de defecto o el elemento que interviene. El subíndice indica el lugar del defecto puntual, y el índice indica la carga efectiva, positiva (·) o negativa (').

Número de tamaño de grano (n) ASTM Medida del tamaño de los granos en un material cristalino. Se obtiene contando la cantidad de granos por pulgada cuadrada con un aumento de 100×.

Plano de deslizamiento Plano recorrido por la línea de dislocación durante el deslizamiento. Normalmente, el plano de deslizamiento es de empaquetamiento compacto, si es que lo hay en la estructura cristalina.

Reacciones químicas de los defectos Reacciones que se escriben con la notación de Kröger-Vink para describir la química de los defectos. Las reacciones se deben escribir de tal manera que se balanceen la masa y las cargas eléctricas, y que se conserve la estequiometría de los sitios. La existencia de defectos que predicen esas reacciones se debe comprobar en forma experimental.

Recocido Tratamiento térmico que normalmente consiste en calentar un material metálico a temperatura elevada durante largo tiempo, con objeto de bajar la densidad de dislocaciones y, de esta manera, impartir ductilidad.

Semiconductor extrínseco Semiconductor que contiene dopantes o impurezas.

Semiconductor intrínseco Semiconductor que no contiene dopantes u otras impurezas.

Semiconductor tipo n Semiconductor dopado con elementos que donan o ceden electrones (por ejemplo, Si dopado con P).

Semiconductor tipo p Semiconductor dopado con elementos que aceptan electrones (por ejemplo, Si dopado con B).

Sinterización o sinterizado Proceso de formación de una masa densa mediante calentamiento de polvos compactados.

Sistema de deslizamiento Combinación del plano de deslizamiento y de la dirección de deslizamiento.

Vacancia Átomo o ion que falta en su sitio cristalográfico normal.

Vector de Burgers b Dirección y distancia en que se mueve una dislocación en cada etapa; también se llama vector de deslizamiento.

ADICIONAL

1. MANNHART, J. y P. CHAUDHARI. "High- T_c Bicrystal Grain Boundaries", *Physics Today*, nov., 2001, pp. 48-53.
2. BURGERS, J.M. *Proc. Kon. Ned. Akad. Wet.*, 42(293), 1948, p. 378.
3. VERHOEVEN, J.D. *Fundamentals of Physical Metallurgy*, Wiley, 1975.
4. GUMBSCH, P. y H. GAO. "Dislocations Faster than the Speed of Sound", *Science*, 283, 1999, pp. 965-968.
5. CASTAING, J y A. DOMÍNGUEZ-RODRÍGUEZ. "Ductility of Ceramics", *The Encyclopedia of Advanced Materials*, D. Bloor et al., Eds., 1994, pp. 659-664.
6. BRUNNER, D. et al. "Surprising Results of a Study on the Plasticity in Strontium Titanate", *J. Am. Ceram. Soc.*, 84(5), 2001, pp. 1161-1163.
7. OROWAN, E. *Z. Phys.*, 89, 1934, p. 634.
8. POLYANI, Z. *Z. Phys.*, 1934, p. 550.
9. MAHAJAN, S. "Dislocations in Compound Semiconductor Crystals and Improvement by Heavy Doping", en *The Encyclopedia of Advanced Materials*, D. BLOOR, M. FLEMINGS y S. MAHAJAN, Eds., Pergamon, 1994, pp. 649-654.
10. REED-HILL, R. E. y R. ABBASCHIAN. *Physical Metallurgy Principles*, 3a. ed., PWS, 1991.
11. MAHAJAN, S. y K.S. SREE HARSHA. *Principles of Growth and Processing of Semiconductors*, McGraw Hill, 1999.
12. NETTLESHIP, I y R. STEVENS. Tetragonal Zirconia Polycrystal (TZP)—A Review, *Int. J. High Technol. Ceram.*, 3(1), 1987, pp. 1-32.
13. KIM, Y.J., I. NETTLESHIP y W.M. KRIVEN. "Phase Transformations in Dicalcium Silicate: II, TEM studies of Crystallography, Microstructure and Mechanisms", *J. Am. Ceram. Soc.*, 75(9), 1992, pp. 2407-19.

PROBLEMAS
Sección 4-1 Defectos puntuales

- 4-1 Calcule la cantidad de vacancias por cm^3 que se esperan en el cobre a 1080°C (justo abajo de la temperatura de fusión). La energía de formación de vacancias es 20000 cal/mol .
- 4-2 La fracción de puntos de red que ocupan las vacancias en aluminio sólido a 660°C es 10^{-3} . ¿Cuál es la energía necesaria para crear vacancias en el aluminio?
- 4-3 La densidad de una muestra de paladio FCC es 11.98 g/cm^3 y su parámetro de red es $3.8902\text{ \AA}$. Calcule
- la fracción de puntos de red que contienen vacancias y
 - la cantidad total de vacancias en un centímetro cúbico de Pd.
- 4-4 La densidad de una muestra de berilio HCP es 1.844 g/cm^3 , y sus parámetros de red son $a_0 = 0.22858\text{ nm}$ y $c_0 = 0.35842\text{ nm}$. Calcule
- la fracción de los puntos de red que contienen vacancias y
 - la cantidad total de vacancias en un centímetro cúbico.
- 4-5 El litio BCC tiene parámetro de red de $3.5089 \times 10^{-8}\text{ cm}$ y contiene una vacancia por cada 200 celdas unitarias. Calcule
- la cantidad de vacancias por centímetro cúbico y
 - la densidad del Li.
- 4-6 El plomo FCC (Pb) tiene un parámetro de red de 0.4949 nm y contiene una vacancia por cada 500 átomos de Pb. Calcule
- la densidad y
 - la cantidad de vacancias por gramo de Pb.
- 4-7 Se produce una aleación de niobio introduciendo átomos de sustitución de tungsteno en la estructura BCC. Se obtiene una aleación con parámetro de red de 0.32554 nm y una densidad de 11.95 g/cm^3 . Calcule la fracción de los átomos de la aleación que son de tungsteno.
- 4-8 Se introducen átomos de estaño en un cristal de cobre FCC y se produce una aleación con parámetro de red de $3.7589 \times 10^{-8}\text{ cm}$ y una densidad de 8.772 g/cm^3 . Calcule el porcentaje atómico de estaño que contiene la aleación.
- 4-9 Se sustituye el 7.5% atómico de los átomos de cromo en su cristal BCC con tantalio. La difracción de rayos X indica que el parámetro de red es 0.29158 nm . Calcule la densidad de la aleación.
- 4-10 Suponga que se introduce un átomo de carbono por cada 100 átomos de hierro, en posiciones intersticiales

del hierro BCC, y se obtiene un parámetro de red de 0.2867 nm . Calcule, para la aleación Fe-C, la densidad y el factor de empaquetamiento.

- 4-11 La densidad del hierro BCC es 7.882 g/cm^3 y el parámetro de red es 0.2866 nm , cuando se introducen átomos de hidrógeno en posiciones intersticiales. Calcule
- la fracción atómica de hidrógeno y
 - la cantidad promedio de celdas unitarias que contienen átomos de hidrógeno.

Sección 4-2 Otros defectos puntuales

- 4-12 Suponga que hay un defecto de Schottky por cada diez celdas unitarias de MgO. Éste tiene la estructura cristalina de cloruro de sodio y un parámetro de red de 0.396 nm . Calcule
- la cantidad de vacancias de anión por cm^3 y
 - la densidad de la cerámica.
- 4-13 El ZnS (sulfuro de zinc) tiene la estructura de la blenda de zinc. Si la densidad es 3.02 g/cm^3 y el parámetro de red es 0.35583 nm , calcule la cantidad de defectos de Schottky
- por celda unitaria y
 - por centímetro cúbico.
- 4-14 Suponga que se introducen los siguientes defectos puntuales:
- iones Mg^{2+} que sustituyen a iones itrio en el Y_2O_3 ,
 - iones de Fe^{3+} que sustituyen a iones magnesio en el MgO,
 - iones Li^{1+} que sustituyen a iones magnesio en el MgO y
 - iones Fe^{2+} que sustituyen a iones sodio en el NaCl.
- ¿Qué otros cambios en cada estructura serían necesarios para mantener el balance de cargas? Explique por qué.
- 4-15 Escriba la ecuación de química de defectos para la introducción de SrTiO_3 en el BaTiO_3 , usando la notación de Kröger-Vink.
- 4-16 Escriba la ecuación de química de defectos para la introducción de PbZrO_3 en PbTiO_3 , usando la notación de Kröger-Vink.
- 4-17 Escriba la ecuación de química de defectos para la introducción de Nb_2O_5 en BaTiO_3 , usando la notación de Kröger-Vink.
- 4-18 Escriba la ecuación de química de defectos para la introducción de Si como dopante en GaAs, usando la notación de Kröger-Vink.
- 4-19 Escriba la ecuación de química de defectos para crear un defecto de Schottky en Cr_2O_3 , usando la notación de Kröger-Vink.

- 4-20 Escriba distintas ecuaciones posibles que puedan expresar la disolución de MgO en alúmina. Use la notación de Kröger-Vink y asegúrese de balancear la cantidad de sitios, la carga eléctrica y la masa.
- 4-21 Explique por qué al agregar pequeñas cantidades de CaO a la zirconia aumenta su conductividad. ¿En qué se usa esta clase de material?

Sección 4-3 Dislocaciones

- 4-22 ¿Cuáles son los índices de Miller de las direcciones de deslizamiento:
- sobre el plano (111) en una celda unitaria FCC?
 - sobre el plano (011) en una celda unitaria BCC?
- 4-23 ¿Cuáles son los índices de Miller de los planos de deslizamiento en celdas unitarias FCC que incluyen la dirección de deslizamiento [101]?
- 4-24 ¿Cuáles son los índices de Miller de los planos {110} en celdas unitarias BCC que incluyen la dirección de deslizamiento [111]?
- 4-25 Calcule la longitud del vector de Burgers en los siguientes materiales:
- niobio BCC,
 - plata FCC y
 - silicio cúbico de diamante.
- 4-26 Determine la distancia interplanar y la longitud del vector de Burgers para el deslizamiento según los sistemas esperados de deslizamiento en el aluminio FCC. Repita lo anterior suponiendo que el sistema de deslizamiento es un plano (110) y una dirección $[1\bar{1}1]$. ¿Cuál es la relación entre los esfuerzos cortantes necesarios para el deslizamiento en los dos sistemas? Suponga que $k = 2$ en la ecuación 4-2.
- 4-27 Determine la distancia interplanar y la longitud del vector de Burgers para el sistema de deslizamiento (110)/ $[1\bar{1}1]$ en tantalio BCC. Repita lo anterior suponiendo que el sistema de deslizamiento es (111)/ $[110]$. ¿Cuál es la relación entre los esfuerzos cortantes necesarios para el deslizamiento en los dos sistemas? Suponga que $k = 2$ en la ecuación 4-2.
- 4-28 ¿Los materiales cerámicos y poliméricos pueden contener dislocaciones?
- 4-29 ¿Por qué los materiales cerámicos son frágiles?
- 4-30 ¿Cuáles son las distintas maneras en que se puede observar la ductilidad en los cerámicos?

Sección 4-4 Observación de dislocaciones

- 4-31 ¿Qué es una "figura de corrosión"?
- 4-32 ¿Qué técnicas se usan para observar las dislocaciones?
- 4-33 ¿Qué es una línea de deslizamiento y qué es una banda de deslizamiento?

Sección 4-5 Importancia de las dislocaciones

- 4-34 ¿Qué significan los términos deformación plástica y deformación elástica?

- 4-35 Una placa de acero se transforma en el chasis de un automóvil. En este proceso ¿interviene la deformación plástica o la deformación elástica? Explique por qué.
- 4-36 ¿Por qué la resistencia teórica de los metales es mucho mayor que la que se observa experimentalmente?
- 4-37 ¿Cuántos gramos de aluminio, con 10^{10} cm/cm³ de densidad de dislocaciones, se necesitan para producir una longitud total de dislocaciones que fuera desde Nueva York hasta Los Ángeles (3000 millas)?
- 4-38 La distancia de la Tierra a la Luna es de 240 000 millas. Si fuera la longitud total de las dislocaciones en un centímetro cúbico de material ¿cuál sería la densidad de dislocaciones en él?
- 4-39 ¿Por qué los metales serían materiales frágiles si no tuvieran dislocaciones?
- 4-40 ¿Por qué las dislocaciones desempeñan un papel importante en el control de las propiedades mecánicas de los materiales y, sin embargo, no importan en la determinación de las propiedades mecánicas de los vidrios?
- 4-41 Suponga que se desea introducir un átomo grande, intersticial o sustitucional, en el cristal, cerca de una dislocación. ¿Cabrá el átomo con más facilidad arriba o abajo de la línea de dislocación que se ve en la figura 4-8(b)? Explique por qué.

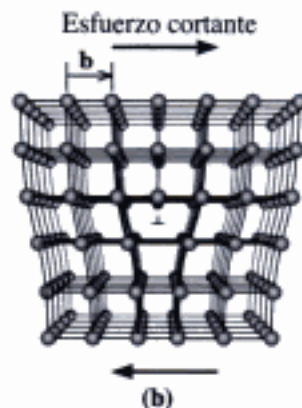


Figura 4-8(b) (Repetida para el problema 4-41). El movimiento continuo de la dislocación termina por crear un escalón.

- 4-42 Compare las relaciones c/a para los siguientes metales HCP, determine en cada uno los procesos probables de deslizamiento y estime el esfuerzo cortante crítico resuelto aproximado. Explique sus resultados. Vea los datos en el apéndice A.
- | | | |
|-------------|-------------|-------------|
| a) zinc | b) magnesio | c) titanio |
| d) zirconio | e) renio | f) berilio. |

Sección 4-6 La ley de Schmid

- 4-43 Un monocristal de metal FCC se orienta de tal forma que la dirección $[001]$ es paralela a un esfuerzo aplicado de 5000 psi. Calcule el esfuerzo cortante resuelto que actúa sobre el plano de deslizamiento (111) , en las direcciones $[\bar{1}10]$, $[0\bar{1}1]$ y $[10\bar{1}]$. ¿Cuál o cuáles sistemas se activarán primero?
- 4-44 Un monocristal de un metal BCC se orienta de tal modo que la dirección $[001]$ es paralela al esfuerzo aplicado. Si el esfuerzo cortante crítico resuelto necesario para que haya deslizamiento es 12000 psi, calcule la magnitud del esfuerzo aparente necesario para hacer que comience el deslizamiento en la dirección $[1\bar{1}1]$ sobre los planos de deslizamiento (110) , (011) y $(10\bar{1})$.
- 4-45 Nuestra descripción de la ley de Schmid sólo fue acerca de monocristales de un metal. Comente la ley de Schmid en un material policristalino. ¿Qué sucedería a medida que el tamaño de grano se hace más y más pequeño?

Sección 4-7 Influencia de la estructura cristalina

- 4-46 ¿Por qué el cobre monocristalino y policristalino es dúctil, mientras que el zinc monocristalino puede tener una gran ductilidad, pero no el zinc policristalino?
- 4-47 ¿Por qué el deslizamiento cruzado en los metales BCC y FCC es más fácil que en los metales HCP? ¿Cómo influye eso sobre la ductilidad de los metales BCC, FCC y HCP?
- 4-48 Ordene los siguientes metales por ductilidad esperada creciente. Cu, Ti y Fe.

Sección 4-8 Defectos de superficie

- 4-49 La resistencia del titanio es 65000 psi cuando el tamaño de grano es 17×10^{-6} m, y es 82000 psi cuando el tamaño de grano es 0.8×10^{-6} m. Determine
- las constantes en la ecuación de Hall-Petch y
 - la resistencia del titanio cuando se reduce el tamaño de grano a 0.2×10^{-6} m.
- 4-50 Una aleación de cobre y zinc tiene las siguientes propiedades:

Díámetro de grano (mm)	Resistencia (MPa)
0.015	170 MPa
0.025	158 MPa
0.035	151 MPa
0.050	145 MPa

Determine

- las constantes de la ecuación de Hall-Petch y
 - el tamaño de grano necesario para que la resistencia sea 200 MPa.
- 4-51 Para un número de grano ASTM 8, calcule la cantidad de granos por pulgada cuadrada

- con 100 aumentos ($100\times$) y
- sin aumento (sin magnificación).

- 4-52 Determine el número de grano ASTM si se observan 20 granos/pulgada cuadrada con 400 aumentos.
- 4-53 Determine el número de grano ASTM si se observan 25 granos/pulgada cuadrada con 50 aumentos.
- 4-54 Determine el número de grano ASTM para los materiales de las figuras 4-18 y 4-23.



Figura 4-18 (Repetida para el problema 4-54). Microestructura del paladio ($100\times$). (De ASM Handbook, vol. 9, Metallography and Microstructure, 1985, ASM International, Materials Park, OH 44073.)



Figura 4-23 Microestructura del hierro, para el problema 4-54 ($500\times$). (De ASM Handbook, vol. 9, Metallography and Microstructure, 1985, ASM International, Materials Park, OH 44073.)

- 4-55 Ciertos cerámicos con propiedades dieléctricas especiales se usan en sistemas de comunicaciones inalámbricas. El tantalato de bario y magnesio (BMT) y el tantalato de bario y zinc (BZT) son ejemplos de esos

materiales. Determine el número ASTM de tamaño de grano de la microestructura cerámica de tantalato de bario y magnesio (BMT) que se muestra en la figura 4-24.

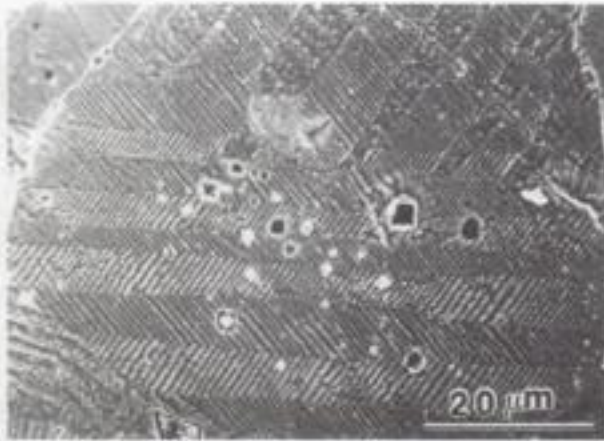


Figura 4-24 Microestructura de una cerámica de tantalato de bario y magnesio (BMT).

- 4-56 La alúmina es el material cerámico que más se usa. Determine el número ASTM de tamaño de grano para la muestra de alúmina policristalina que se muestra en la figura 4-25.

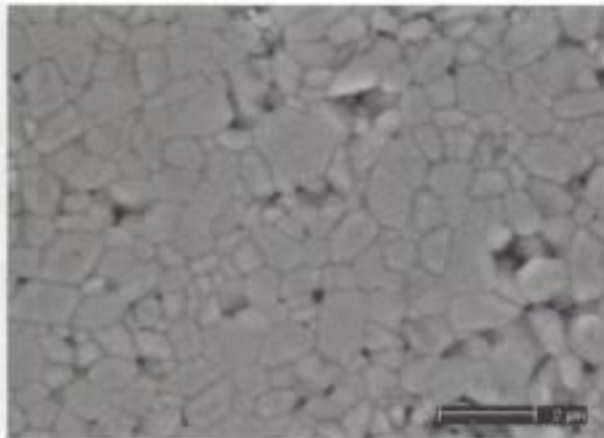


Figura 4-25 Microestructura de una cerámica de alúmina. (Cortesía de Richard McAfee y el Dr. Ian Nettleship.)

- 4-57 ¿Qué es el análisis de imágenes? ¿Cómo se usa en la determinación de la microestructura?
- 4-58 El ángulo θ de un límite inclinado es $\sin(\theta/2) = b/2D$ (Véase la Fig. 4-19). Compruebe si es correcta esa ecuación.

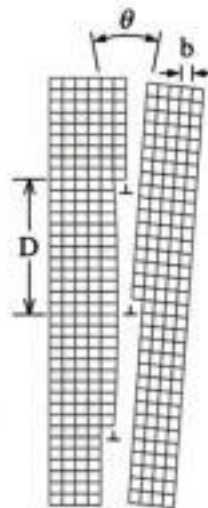


Figura 4-19 (Repetida para los problemas 4-58, 4-59 y 4-60). El límite de grano con ángulo pequeño se produce con un conjunto de dislocaciones que causa un desalineamiento angular θ entre las redes a ambos lados del límite.

- 4-59 Calcule el ángulo θ de un límite de grano con ángulo pequeño en aluminio FCC, cuando las dislocaciones están separadas 5000 Å. (Véase la Fig. 4-19 y la ecuación del problema 4-58.)
- 4-60 Calcule la distancia promedio entre dislocaciones, para el hierro BCC, en un límite de grano en ángulo pequeño inclinado 0.50°. (Véase la Fig. 4-19.)
- 4-61 ¿Por qué se usan partículas ultrafinas de metales y aleaciones para catalizar las reacciones en la refinación del petróleo?
- 4-62 ¿Qué se agrega a un cristal de alúmina para convertirlo en un cristal de rubí?
- 4-63 ¿Por qué un monocristal de un cerámico superconductor es capaz de conducir mucho más corriente por unidad de área que un superconductor de un cerámico policristalino de la misma composición?
- 4-64 ¿Qué es un dominio? ¿Qué clases de materiales contienen dominios? Describa algunos ejemplos.
- 4-65 Describa cualquier aplicación de un material ferromagnético, uno ferrimagnético y uno ferroeléctrico.

Sección 4-9 Importancia de los defectos

- 4-66 ¿Qué hace que el acero simple al carbono sea más duro que el hierro puro?
- 4-67 ¿Por qué la joyería se fabrica con oro o plata en aleación con cobre?
- 4-68 ¿Por qué se prefiere usar cristales de semiconductor que contengan una cantidad de dislocaciones tan pequeña como sea posible?

- 4-69 En aplicaciones estructurales (por ejemplo, acero para puentes y edificios o aleaciones de aluminio para aviones) ¿por qué se usan aleaciones y no metales puros?
- 4-70 ¿Cómo se altera la conductividad del silicio al usar P o B como dopantes?
- 4-71 ¿Las dislocaciones controlan la resistencia de un vidrio de silicato? Explique por qué.
- 4-72 ¿Qué significa endurecimiento por deformación?
- 4-73 ¿Con cuál mecanismo de endurecimiento se relaciona la ecuación de Hall-Petch?
- 4-74 El cobre puro se endurece agregándole pequeñas concentraciones de Be. ¿Con qué mecanismo de endurecimiento se relaciona eso?



Problemas de diseño

- 4-75 La densidad del aluminio puro, calculada con datos cristalográficos, debe ser 2.69955 g/cm^3 .
- Diseñe una aleación de aluminio cuya densidad sea 2.6450 g/cm^3 .
 - Diseñe una aleación de aluminio cuya densidad sea 2.7450 g/cm^3 .
- 4-76 Usted desearía una placa de metal que se pueda soldar con facilidad. Durante el proceso de soldadura, el metal junto a la unión se calienta casi hasta su temperatura de fusión y, dependiendo de los parámetros de la soldadura, puede permanecer caliente durante algún tiempo. Diseñe una aleación que minimice la pérdida de resistencia en esa "zona afectada por el calor" durante el proceso de soldadura.
- 4-77 Se necesita un material que sea ópticamente transparente, pero eléctricamente conductor. Esos materiales se usan en pantallas digitales. ¿Qué clase de materiales se pueden usar para esta aplicación? (Sugerencia: recuerde los recubrimientos de materiales que pueden proporcionar conductividad electrónica o iónica; el sustrato debe ser transparente para esta aplicación.)



Problemas en computadora

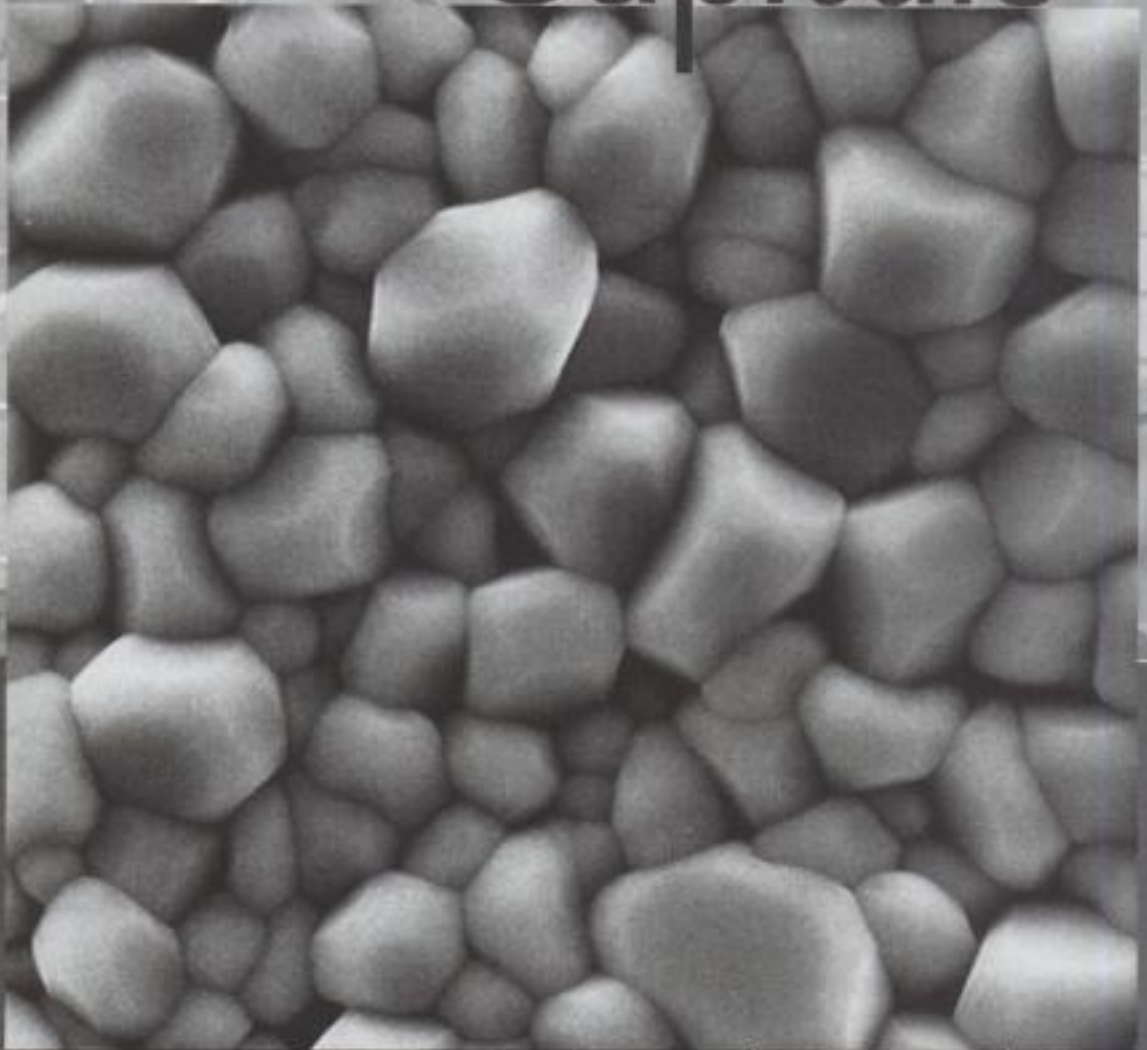
- 4-78 *Dependencia entre temperatura y concentración de vacancias.* Escriba un programa de computadora que entregue la concentración de equilibrio de vacancias en un elemento metálico, proporcionada por el usuario,

en función de la temperatura. El usuario debe especificar un intervalo razonable y válido de temperaturas (por ejemplo, de 100 a 1200 K para el cobre). Suponga que la estructura cristalina que se especificó al principio es válida para ese intervalo de temperaturas. Pida al usuario que ingrese la energía de activación para la formación de un mol de vacancias (Q_v). A continuación, el programa debe pedir al usuario que teclee la densidad del elemento y su estructura cristalina (FCC, BCC, etcétera). En este caso puede usar caracteres de variable para detectar el tipo de estructuras cristalinas (por ejemplo "F" o "f" por FCC, "B" o "b" por BCC, etcétera). Asegúrese de tener en cuenta el uso de las unidades correctas de temperatura, densidad, etcétera. El programa debe preguntar al usuario cuáles son las unidades del intervalo de temperaturas: °C, °F o K, y convertir las temperaturas en K, antes de hacer los cálculos. A continuación, el programa debe usar esta información para determinar la cantidad de átomos por unidad de volumen y proporcionar ese valor como resultado. Después, el programa debe calcular la concentración de vacancias en equilibrio a distintas temperaturas. La primera temperatura debe ser la mínima especificada y, en adelante, se debe aumentar en 100 K u otro incremento adecuado. A continuación se puede usar algún programa para graficar los datos y mostrar la concentración de equilibrio de vacancias en función de la temperatura. Tenga en cuenta qué escalas se usarán para mostrar mejor los resultados.

- 4-79 *Ecuación de Hall-Petch.* Escriba un programa de computadora que pida al usuario teclear dos conjuntos de valores de σ_y y tamaño de grano (d) para un material metálico. A continuación, con esos datos el programa debe calcular la ecuación de Hall-Petch e imprimirla. Después, el programa debe pedir al usuario que ingrese otro valor de tamaño de grano y calcular el esfuerzo de cedencia o viceversa.
- 4-80 *Calculador de número ASTM de tamaño de grano.* Escriba un programa que pida al usuario ingresar el aumento de una micrografía de la muestra cuyo número ASTM se va a calcular. A continuación, el programa debe pedir al usuario la cantidad de granos contenidos y el área (en pulgadas cuadradas) que los contenía. Después, el programa debe calcular el número ASTM, teniendo en cuenta cuando el aumento de la micrografía no sea 100 y que el área no sea de una pulgada cuadrada.

By Arkanosant...

Capítulo



Acc.V	Spot	Magn	Det	WD	Exp		
15.0 kV	4.0	10000x	SE	9.9	1	CBMT8-5	2 μm

Microestructura del cerámico de tantalato de magnesio y bario (BMT, por sus siglas en inglés) sinterizado. Este material cerámico se usa para fabricar componentes electrónicos para comunicaciones inalámbricas. El proceso de sinterización es impulsado por la difusión de átomos y iones.

Movimientos de átomos y iones en los materiales

¿Alguna vez se preguntó...

- ...por qué el aluminio se oxida con más facilidad que el hierro y, sin embargo, decimos que normalmente el aluminio no se "oxida"?
- ...qué clase de plástico se usa para fabricar las botellas de bebidas carbonatadas?
- ...cómo se endurecen las superficies de algunos aceros?
- ...por qué se protegen las fibras ópticas con un recubrimiento de polímero?
- ...quién inventó el primer lente de contacto?
- ...qué es el acero galvanizado?
- ...cómo falla el filamento de tungsteno de un foco?

En el capítulo 4 aprendimos que los arreglos atómicos y iónicos en los materiales nunca son perfectos. También vimos que la mayoría de los materiales no son elementos puros; son aleaciones o mezclas de distintos elementos o compuestos. Los distintos tipos de átomos o iones suelen "difundirse" o moverse dentro del material, de tal modo que se minimicen las diferencias

en su concentración. La difusión se refiere a un flujo neto y observable de átomos u otras especies. Depende del gradiente inicial de concentraciones y de la temperatura. Del mismo modo que el agua fluye de una montaña hacia el mar para minimizar su energía potencial gravitacional, los átomos y los iones tienden a moverse en una forma predecible para eliminar diferencias de

concentración y producir composiciones homogéneas y uniformes que hagan al material termodinámicamente más estable.

En este capítulo aprenderemos que la temperatura influye sobre la cinética de la difusión, y que la diferencia de concentraciones contribuye al flujo neto general de las especies que se difunden. El objetivo de este capítulo es examinar los principios y las aplicaciones de la difusión en los materiales. Ilustraremos el concepto de difusión con ejemplos de varias tecnologías del mundo real que dependen de la difusión de átomos, iones o moléculas.

Presentaremos una perspectiva de las leyes de Fick, que describen en forma cuantitativa el proceso de difusión. También veremos cómo la estructura relativamente abierta de distintos cristales, y el tamaño de los átomos o iones, la temperatura y la concentración de las especies que se difunden afectan la velocidad a la que se lleva a cabo la difusión. Describiremos ejemplos específicos de la forma en que se usa la difusión en la síntesis y el procesamiento de materiales novedosos, así como en la fabricación de componentes usando esos materiales.

5-1 Aplicaciones de la difusión

La **difusión** indica el flujo neto de cualquier especie, como iones, átomos, electrones, vacancias y moléculas. La magnitud de este flujo depende del gradiente inicial de concentraciones y de la temperatura. El proceso de la difusión es fundamental en una gran cantidad de tecnologías importantes de hoy. En las tecnologías de procesamiento de materiales, la clave es controlar la difusión de átomos, iones, moléculas u otras especies. Hay cientos de aplicaciones y de tecnologías que dependen ya sea de mejorar o de limitar la difusión. Los siguientes son sólo unos pocos ejemplos.

Cementación o carburización para el endurecimiento superficial de los aceros Digamos que se desea tener una superficie, como la de los dientes de un engrane, que sea dura. Sin embargo, no se desea que todo el engrane sea duro. Para aumentar la dureza de la superficie, se usan procesos de cementación. En la cementación, una fuente de carbono, por ejemplo, polvo de grafito o un gas que contenga carbono, difunde carbono en partes de acero tales como engranes (Fig. 5-1). En capítulos posteriores, se verá cómo la mayor concentración de carbono en la superficie del acero aumenta la dureza de éste. En forma parecida a la introducción del carbono, también se usa un proceso llamado **nitruración**, en el que se introduce nitrógeno en la superficie de un material metálico. También la difusión desempeña un papel central en el control de las transformaciones de fase necesarias para el tratamiento térmico de metales y aleaciones, el procesamiento de cerámicos y la solidificación y unión de materiales (sección 5-9).

Difusión de dopantes para dispositivos semiconductores Toda la industria de la microelectrónica, tal como la conocemos, no existiría si no tuviéramos una buena comprensión de la difusión de distintos átomos en el silicio u otros semiconductores. En los capítulos 3 y 4 se revisó el significado de dopantes tipo n y tipo p en un semiconductor. La creación de la **unión p-n** implica la difusión de átomos dopantes, como por ejemplo de fósforo (P), arsénico (As), antimonio (Sb), boro (B), aluminio (Al), etc., en ciertas regiones ultrapequeñas de obleas de silicio (Fig. 5-2).[1] Una unión p-n es una región del semiconductor, uno de cuyos lados está dopado con dopantes *tipo n* (por ejemplo, As en Si) y el otro lado está dopado con dopantes *tipo p* (por ejemplo, B en Si). En este ejemplo, no sólo las distintas regiones del silicio contienen una concentración especificada de dopantes, sino que esos dopantes en realidad ocupan los lugares del silicio. Cuando estudiemos las propiedades eléctricas de los materiales en el



Figura 5-1 Horno para tratamiento térmico de acero mediante el proceso de cementación.
(Cortesía de Cincinnati Steel Treating.)

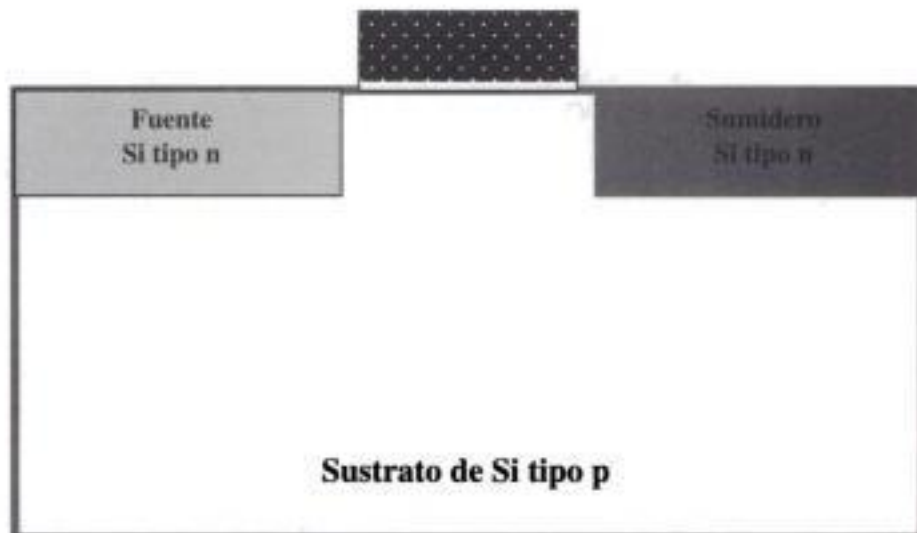


Figura 5-2 Esquema de un transistor n-p-n. La difusión desempeña un papel crítico en la formación de las distintas regiones formadas en los sustratos de semiconductor. El corazón de la tecnología de microelectrónica es la creación de millones de transistores como éste.

capítulo 18, el lector aprenderá que la difusión de electrones y huecos desempeña un papel importante en el funcionamiento de los dispositivos semiconductores, como son los transistores.

Cerámicos conductores En general, los cerámicos policristalinos tienden a ser buenos aislantes de electricidad. Los fuertes enlaces covalentes y iónicos junto con sus propiedades microestructurales contribuyen a la conductividad eléctrica relativamente pobre que tienen muchos cerámicos. Sin embargo, hay muchos cerámicos que pueden conducir electricidad y, de hecho, algunos son superconductores (capítulo 1). La difusión de iones, electrones o huecos también representan un papel importante en la conductividad eléctrica de muchos **cerámicos conductores**, como la zirconia (ZrO_2) parcial o totalmente estabilizada o el óxido de indio y estaño (también conocida como *ITO*). El óxido de cobalto y litio ($LiCoO_2$) es un ejemplo de un material iónicamente conductor que se usa en las baterías de ion litio. Estos materiales iónicamente conductores se usan en productos como sensores de oxígeno en los automóviles, pantallas sensibles al tacto, celdas de combustible y baterías. La capacidad de los iones para difundir y proporcionar un trayecto para la conducción eléctrica desempeña un papel importante para permitir esas aplicaciones.

Materiales magnéticos para discos duros Las aleaciones de cobalto se usan en la fabricación de discos duros para computadoras personales. Se pueden producir capas delgadas de estas aleaciones con un proceso llamado **pulverización catódica**. En el proceso de pulverización catódica, los blancos se bombardean con haces de iones. Esos blancos se hacen con elementos o compuestos que contengan los constituyentes necesarios con los que se forman las películas delgadas. Los átomos "saltan" de los blancos y se depositan sobre un sustrato, produciendo una película delgada. Con la pulverización de películas delgadas de aleación de cobalto se agrega con frecuencia cromo para mejorar sus propiedades magnéticas. Se ha encontrado que las películas depositadas de átomos de cromo (Cr) se encuentran principalmente dentro de los granos magnéticos de la aleación de cobalto. Para que el cromo tenga un efecto magnético útil, se necesita un tratamiento térmico que difunda los átomos de cromo hacia los límites de grano del material magnético. Esto se logra usando un tratamiento térmico de **recocido** que implica calentar la película depositada a una alta temperatura, durante un tiempo razonablemente largo, para permitir la difusión de los átomos de cromo, desde el interior de los granos hasta los límites de grano. La figura 5-3 es un esquema de una película delgada recocida depositada de Co-Pt-Ta-Cr. El cromo se difunde hacia los límites de grano después del recocido. Esto ayuda a mejorar las propiedades magnéticas de los discos duros que se fabrican con esas películas.[2]

Fabricación de botellas de plástico para bebidas y de globos de Mylar™ No siempre es benéfica la difusión. En algunas aplicaciones, es deseable limitar el grado de difusión para ciertas especies. Por ejemplo, en la fabricación de ciertas botellas de plástico, debe minimizarse la difusión del dióxido de carbono (CO_2). Es una de las principales razones por las que

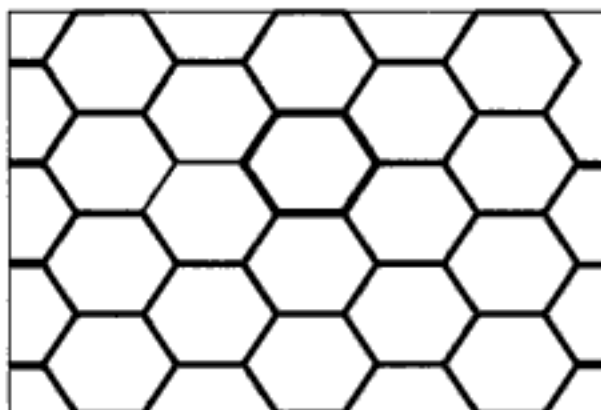


Figura 5-3

Esquema de la microestructura de la película de Co-Pt-Ta-Cr después del recocido. La mayor parte del cromo se difunde desde los granos hacia los límites de grano, después del proceso de recocido. De este modo, se ayuda a mejorar las propiedades magnéticas del disco duro.

se usa tereftalato de polietileno (PET) para fabricar botellas que aseguren que las bebidas carbonatadas que contienen no pierdan su presión durante un tiempo razonable. Otro ejemplo de una aplicación donde se debe limitar la difusión es el de los globos de Mylar™. Los globos de helio hechos con Mylar™ (PET recubierto con aluminio) retienen al helio mucho más tiempo, porque la delgada capa de aluminio ayuda a evitar la difusión del helio hacia el exterior.

Oxidación del aluminio El lector podrá haber oído o sabrá que el aluminio no se “oxida”. En realidad, el aluminio se oxida con más facilidad que el hierro. Sin embargo, el óxido de aluminio (Al_2O_3) forma una capa muy protectora, pero delgada, sobre la superficie del aluminio, impidiendo la difusión del oxígeno e inhibiendo la posterior oxidación del aluminio en el interior. La capa de óxido no tiene color y es delgada; por consiguiente, es invisible. Es la razón por la cual se cree que el aluminio no se oxida. En el capítulo 22, describiremos también algunos ejemplos de aleaciones de aluminio que sufren la corrosión.

Recubrimientos y películas delgadas Los recubrimientos y las películas delgadas se usan frecuentemente en el proceso de manufactura para limitar la difusión del vapor de agua, oxígeno u otras sustancias. Por ejemplo, las estructuras de acero se pintan para evitar o minimizar la oxidación. Cuando un ambiente corrosivo es más agresivo, se puede aplicar una capa de zinc (Zn) a las estructuras de hierro, como chasis de automóviles, estructuras en refinerías químicas, equipo de procesamiento de alimentos, barandales, etc., para reducir la oxidación del acero (Fig. 5-4).[3] El proceso de aplicar una cubierta de zinc sumergiendo las partes en un gran baño de zinc fundido (temperatura de fusión $\sim 420^\circ\text{C}$) se llama **galvanizado por**



Figura 5-4 Partes y estructuras de acero galvanizado por inmersión en caliente, para evitar la corrosión. (Cortesía de Casey Young y Barry Dugar, de Zinc Corporation of America.)

inmersión en caliente. La naturaleza química del zinc, y no sólo su barrera a la difusión, desempeña un papel muy importante en la protección del acero del interior.

Recubrimientos de barrera térmica en álabes de turbina En los motores de avión, algunos álabes de turbina están recubiertos con óxidos cerámicos; por ejemplo zirconia estabilizada con itria (YSZ, por sus siglas en inglés). Estos recubrimientos cerámicos protegen a la aleación contra las altas temperaturas, de aquí el nombre de **recubrimientos de barrera térmica** (Fig. 5-5).[4] La difusión de oxígeno a través de estos revestimientos cerámicos y la subsecuente oxidación de la aleación desempeñan un papel fundamental en la determinación de la vida y durabilidad de los álabes de turbina. En la figura 5-5, EBPVD significa deposición física de vapor con haz de electrones; TBC significa recubrimiento de barrera térmica. La capa de adhesión es una aleación ya sea de platino o de molibdeno, y como su nombre lo indica, proporciona la adhesión entre el TBC y el sustrato.

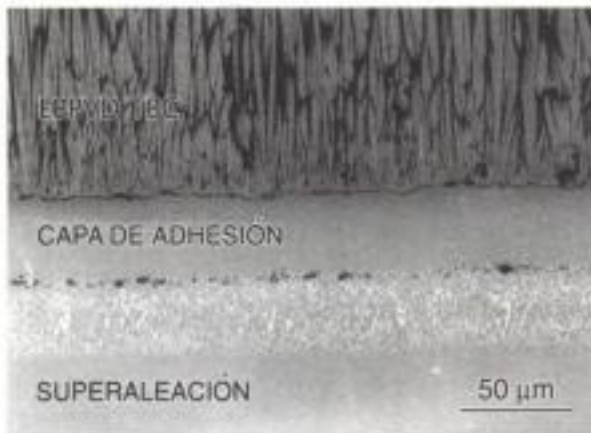


Figura 5-5

Recubrimiento de barrera térmica sobre una superaleación a base de níquel. (Cortesía del Dr. F.S. Pettit y el Dr. G.H. Meier, Universidad de Pittsburgh.)

Fibras ópticas y componentes microelectrónicos Otro ejemplo de la difusión es el de los recubrimientos en torno a las fibras ópticas. Las fibras ópticas hechas de sílice (SiO_2) se recubren con materiales poliméricos para evitar la difusión de moléculas de agua. El vapor de agua tiene dos efectos relacionados, pero separados, sobre el funcionamiento de las fibras ópticas de vidrio. El primero es que la incorporación de agua en forma de grupos hidroxilo (OH^-) aumenta las pérdidas ópticas (es decir, la señal no puede viajar lo suficientemente lejos sin ser atenuada en forma apreciable). El segundo es que el vapor de agua ataca la superficie del vidrio y causa microgrietas que disminuyen la resistencia del vidrio (capítulo 6). Se usan recubrimientos plásticos para encapsular componentes de circuitos microelectrónicos como capacitores y otros, para evitar la difusión del vapor de agua u otras sustancias que puedan perjudicar su funcionamiento.

Tratamiento de agua y aire En aplicaciones de ingeniería ambiental, como el tratamiento de agua o de aire, frecuentemente interesa la forma en que se difunden ciertos iones o moléculas a través de un filtro o de una resina de intercambio iónico. En ciertas aplicaciones de administración de medicinas, los médicos y demás profesionales del cuidado de la salud se interesan en la difusión de las sustancias activas u otras moléculas bioquímicas a través de los pequeños capilares que conducen la sangre.

Arrastre y difusión En algunas aplicaciones técnicas, es importante el movimiento de pequeñas partículas como consecuencia de fuerzas distintas del gradiente de concentración y de la temperatura. Se hace la distinción entre el movimiento de átomos, moléculas, iones, electrones, huecos, etc., producidos por gradientes de concentración y de temperatura (difusión) o alguna otra fuerza impulsora, como gradientes de densidad, campo eléctrico o campo magnético. El movimiento de partículas, átomos, iones, electrones, huecos, etc., bajo las fuerzas impulsoras

distintas a la difusión, se llama **arrastre**, o **deriva para el caso de transporte de carga***. Por ejemplo, si se abre un frasco de perfume en un extremo de un recinto, se puede oler el perfume en el otro extremo. Este transporte de moléculas contenidas en el perfume se debe principalmente a transferencia de masa por convección. La difusión sí sucede, y desempeña su papel. Sin embargo, una difusión a grandes distancias tardaría un tiempo mucho mayor; en consecuencia, en este caso no es factor principal. Otro ejemplo en donde es importante el proceso de arrastre es la **electroforesis**, el movimiento de partículas finas (o de moléculas grandes) cargadas, bajo un campo eléctrico. Este proceso se usa en la aplicación de pintura a los automóviles. También se usa la electroforesis para comprender la química superficial de cerámicos y demás partículas finas. De igual modo, la electroforesis se usa en ciertas aplicaciones de bioingeniería para separar moléculas de ADN de distintos pesos moleculares. El movimiento de iones en una solución (con frecuencia acuosa) bajo un campo eléctrico, produce capas delgadas de metales y aleaciones. A este proceso se le llama **electrodeposición (o galvanoplastia)**. El principio básico de este proceso también se usa en la extracción y refinación de metales como cobre (Cu) y aluminio (Al). En los ejemplos 5-1 y 5-2 se describirá la diferencia entre el arrastre, o deriva de electrones, y la difusión de portadores en un semiconductor.

EJEMPLO 5-1 Difusión de Ar en He y de Cu en Ni y viceversa

Imagine una caja con una división impermeable que separa dos volúmenes iguales (Fig. 5-6). En un lado se tiene gas de argón (Ar) puro; en el otro lado, gas de helio (He) puro. Explique qué sucederá cuando se abra la división. ¿Qué sucederá si se sustituye el lado del Ar con un monocristal de Cu y el lado de He con un monocristal de Ni?

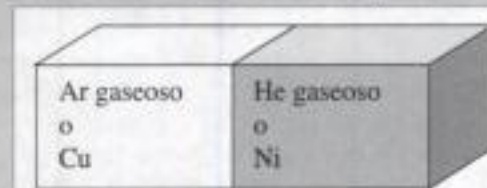


Figura 5-6 Ilustración de la difusión de Ar/He y Cu/Ni (para el ejemplo 5-1).

SOLUCIÓN

Antes de abrir la división, un compartimiento no tiene argón y el otro no tiene helio; es decir, hay un gradiente de concentración de Ar y He. Cuando se abre la división, los átomos de Ar se difunden hacia el lado del He y viceversa. Esta difusión continuará hasta que toda la caja tenga una concentración uniforme de ambos gases. Podrá haber también algunos flujos de convección impulsados por los gradientes de densidad. Si se tomaran muestras aleatorias de distintas partes de esta caja después de unas pocas horas, obtendríamos concentraciones estadísticamente uniformes de Ar y He. Nótese que los átomos de Ar y He continuarán moviéndose por todo el interior de la caja, debido a la energía térmica; sin embargo, no habrá gradientes de concentración.

Si se abre la división hipotética entre los monocristales de Ni y de Cu a temperatura ambiente, veríamos que, semejante al caso del Ar/He, existen gradientes de concen-

*N. del R. T.: El término *drift* se refiere al fenómeno de difusión en donde las partículas se desplazan a diferentes velocidades en forma aleatoria. De ahí que el autor ejemplifique con la migración de moléculas de un perfume para introducir el concepto. A este fenómeno se le puede llamar arrastre, y se refiere al desplazamiento o traslado de átomos, iones, huecos, entre otros. La movilidad de portadores de carga, particularmente electrones en su estado inicial, se asume como si fuera un "gas de electrones", haciendo la analogía como si fuera un "gas de moléculas" de cualquier sustancia. Cuando en un sólido actúa una fuerza impulsora distinta de la concentración, entonces los electrones se desplazan a una velocidad promedio, la que es conocida como **velocidad de deriva**. Sin embargo, algunos autores usan el término velocidad de arrastre. Por tanto, al fenómeno en su conjunto le llamaremos como "arrastre" y usaremos este término, y sólo cuando se considere necesario o, más adelante en el capítulo 18 y probablemente 20, se usará el término deriva y velocidad de deriva.

tración, pero la temperatura es demasiado baja para apreciar alguna difusión importante de átomos de Cu en el monocristal de Ni y viceversa. Es un ejemplo de un caso en el que existe una difusión con gradiente de concentración, pero que, debido a la baja temperatura, la cinética para la difusión no es favorable. Con seguridad, si se aumenta la temperatura (por ejemplo a 600 °C) y se espera un tiempo mayor (por ejemplo ~24 horas), se apreciaría la difusión de átomos de cobre en el monocristal de Ni y viceversa. Después de un tiempo muy largo, por ejemplo, de algunos meses, todo el sólido tendrá una concentración uniforme de átomos de Ni y de Cu. El nuevo sólido que se forma consiste en átomos de Cu y Ni disueltos por completo entre sí, y al material que resulta se le llama "solución sólida", concepto que se estudiará con más detalle en el capítulo 9.

Este ejemplo también muestra lo que muchos podrán conocer por intuición. La difusión de átomos y moléculas sucede con más rapidez en gases que en líquidos, y en líquidos que en sólidos. Como se verá en el capítulo 8 y otros más, la difusión tiene un efecto apreciable sobre la evolución de la microestructura durante la solidificación de las aleaciones en el tratamiento térmico de metales y aleaciones y en el procesamiento de materiales cerámicos.

EJEMPLO 5-2

Difusión y arrastre de portadores de carga en un semiconductor

La unión p-n es la base de todos los transistores (Fig. 5-2) y otros dispositivos.[1] Una unión p-n se forma en el silicio monocristalino (Si) **dopando** el lado n con átomos de fósforo (P) y el lado p, con átomos de boro (B) (Fig. 5-7). El dopado se puede realizar difundiendo átomos de una fuente de dopante que puede ser líquida, sólida o gaseosa, llamada **precursor**. A veces se usa el proceso de **implantación de iones**, en el que los átomos de dopante se incorporan usando haces iónicos de alta energía, en lugar de difundir térmicamente los átomos de dopante. Como se describió en el capítulo 3, cada átomo de fósforo (P) aporta un electrón adicional, y cada átomo de B agregado en el lado p tiene deficiencia de un electrón. A ese electrón faltante se le llama **hueco** o agujero, y se le maneja como partícula que tiene una carga positiva. La magnitud de la carga es la misma que la de un electrón, 1.6×10^{-19} C. Imagine que se inicia la difusión de una especie mediante gradientes de temperatura y de concentración, y que los campos eléctricos y magnéticos externos pueden iniciar el arrastre de los portadores. Entonces:

- a) Demuestre, con un esquema, en qué dirección se difundirán los electrones y los huecos cuando se forme una unión p-n.

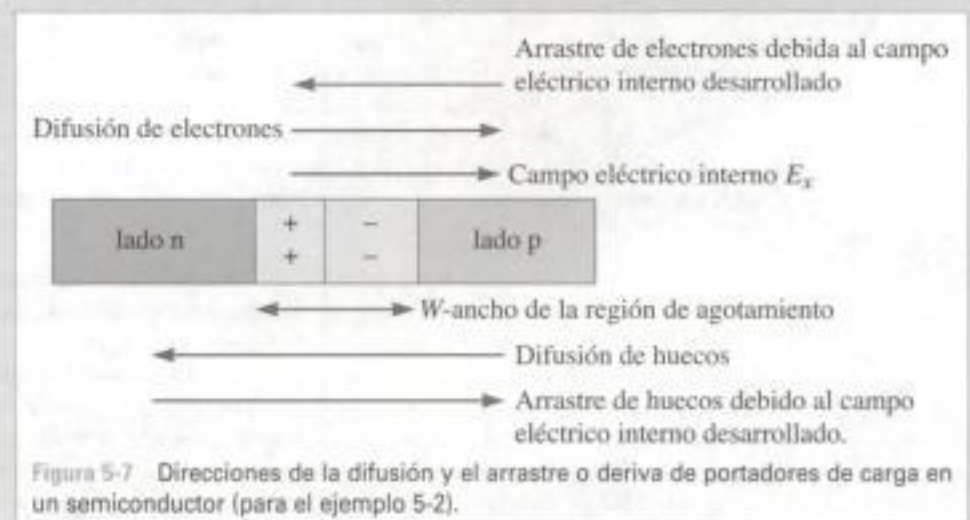


Figura 5-7 Direcciones de la difusión y el arrastre o deriva de portadores de carga en un semiconductor (para el ejemplo 5-2).

- b) Compare este caso con la difusión de átomos de Cu y Ni del ejemplo anterior.
- c) Con base en lo anterior, comente sobre el arrastre de electrones y huecos impulsado por el campo eléctrico en la unión p-n. Suponga que la temperatura es 300 K.

SOLUCIÓN

- a) La concentración de huecos y de electrones se llamará "p" y "n", respectivamente. Se indicará el lado de la unión p-n con los subíndices p y n. En el lado n se tienen átomos de P que proporcionan electrones adicionales. El resultado es que la concentración de electrones en el lado n (n_n) es mayor que en el lado p (n_p). En el lado p, la concentración de huecos (p_p) es mayor. Hay una pequeña concentración de electrones (n_p) en el lado p, porque los enlaces entre átomos de silicio se rompen debido a la energía térmica, y producen la creación de pares electrón-hueco. En consecuencia, cabe esperar movimiento de electrones del lado n al lado p. Como ese movimiento se induce por gradiente de concentración, se dice que los electrones se difundirán del lado n al lado p. De igual forma, como la concentración de huecos en el lado p (p_p) es mayor que en el lado n (p_n), los huecos se difundirán del lado p al lado n (Fig. 5-7). Obsérvese que a través de la unión p-n hay también un gradiente de concentración de átomos de P y B. Sin embargo, esos átomos, que en realidad no se han convertido en iones después de ceder o aceptar un electrón, no se difunden, porque la temperatura es 300 K y es demasiado baja para eso.
- b) Al difundirse los electrones del lado n al lado p, una parte del cristal del lado n adquiere carga positiva, porque cada átomo de P ha cedido un electrón y se convierte en un ion P con carga positiva. De igual manera, cada átomo de B se convierte en un ion B con carga negativa. Cuando cierta cantidad de electrones se ha difundido, dejan atrás iones P con carga positiva en parte del cristal del lado n. Cuando los huecos se han difundido del lado p hacia el lado n, dejan atrás iones B con carga negativa. Sin embargo, la difusión de electrones y huecos no continúa hasta que se igualan las concentraciones de electrones y huecos. A medida que más electrones tratan de difundirse del lado n al lado p, se "ven" o encuentran los iones de B con carga negativa. De igual forma, a medida que más y más huecos tratan de difundirse desde el lado p hacia el lado n, encuentran iones P con carga positiva y el movimiento encuentra resistencia. Así, a diferencia del caso de los átomos de Ar y He (ejemplo 5-1), la concentración de electrones y huecos no se iguala. Se establece un campo eléctrico interno (E_x) sobre una distancia W y evita la igualación de concentraciones de electrones y huecos. El voltaje interno que resulta se llama potencial de contacto V_0 .
- c) El campo eléctrico interno E_x es tal que hace que los electrones del lado p se desplacen hacia el lado n. También, el mismo campo eléctrico interno hace que los huecos del lado n se desplacen hacia el lado p. Así, el flujo de electrones debido a la difusión y el arrastre se hace en direcciones opuestas. De igual modo, el movimiento de huecos debido a la difusión y el arrastre tienen direcciones opuestas. Se puede demostrar que se anulan las corrientes eléctricas debidas a difusión y arrastre de cada clase de portador. El resultado es que una unión p-n en equilibrio no conduce corriente neta. Después se explicará que, si se aplica un voltaje externo de polarización (V), se puede sintonizar la resistencia y, en consecuencia, el flujo de corriente en una unión p-n, lo que permitirá obtener dispositivos útiles como son los transistores (capítulo 18).

5.2 Estabilidad de átomos y iones

En el capítulo 4 se demostró que con frecuencia existen imperfecciones y que también se pueden introducir en forma deliberada en un material. Sin embargo, esas imperfecciones, y en realidad hasta los átomos o iones en sus posiciones normales en el cristal, no son estables o están en reposo. En cambio, los átomos o los iones poseen energía térmica y se mueven. Por ejemplo, un átomo puede moverse desde un lugar normal en la estructura cristalina y ocupar una vacancia vecina. Un átomo también puede moverse desde un sitio intersticial a otro. Los átomos o los iones pueden saltar a través de un límite de grano, haciendo que se mueva el límite de grano.

La capacidad que tienen los átomos y los iones para difundirse aumenta con la temperatura; es decir, aumenta la energía térmica que poseen los átomos y los iones. La rapidez del movimiento de un átomo o un ion, en relación con la temperatura o la energía térmica, se expresa con la *ecuación de Arrhenius*:

$$\text{Rapidez} = c_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (5-1)$$

en donde c_0 es una constante, R es la constante de los gases ($1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$), T es la temperatura absoluta (en K) y Q es la **energía de activación** (cal/mol) necesaria para mover un equivalente al número de Avogadro, en átomos o iones. Esta ecuación se deduce a partir de un análisis estadístico de la probabilidad de que los átomos adquieran la energía adicional Q necesaria para causar el movimiento. La rapidez se relaciona con la cantidad de átomos que se mueve.

Se puede reexpresar la ecuación tomando logaritmos naturales de ambos lados:

$$\ln(\text{rapidez}) = \ln(c_0) - \frac{Q}{RT} \quad (5-2)$$

Si se hace una gráfica de $\ln(\text{rapidez})^1$ de alguna reacción en función de $1/T$ (Fig. 5-8), la pendiente de la curva será $-Q/R$ y, en consecuencia, se podrá calcular Q . La constante c_0 corresponde a la ordenada al origen, $\ln c_0$, cuando $1/T$ es cero.

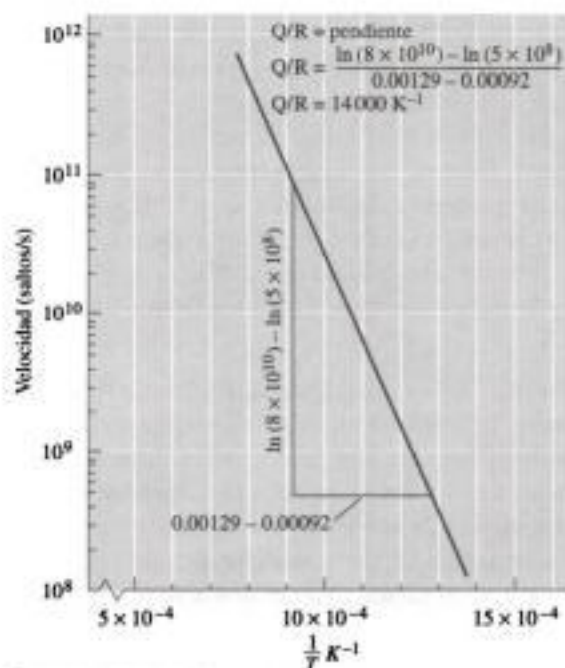


Figura 5-8
La gráfica de Arrhenius de $\ln(\text{velocidad})$ en función de $1/T$ se puede usar para determinar la energía de activación necesaria para una reacción.

¹ N. del T.: Cuando se trata de reacciones químicas se acostumbra usar el término "velocidad de reacción", como puede ser este párrafo. En el contexto de ciencia de materiales, se usa el término "rapidez" o "tasa" en los procesos físicos, como la difusión.



Figura 5-9

Svante August Arrhenius (1859-1927) hizo trabajos precursores en el campo de la cinética de las reacciones químicas e introdujo la noción de energía de activación. (Cortesía de la Biblioteca de la Universidad de Pennsylvania.)

Svante August Arrhenius (1859-1927, figura 5-9), químico sueco ganador del Premio Nobel de Química en 1903 por sus investigaciones en teoría electrolítica de la disociación, había aplicado esta idea a las velocidades de reacciones químicas en soluciones acuosas. Su idea básica de energía de activación y de velocidades de reacciones químicas en función de la temperatura se han aplicado desde entonces en muchos campos, incluyendo la difusión. La energía de activación es la cantidad de energía necesaria para hacer que sucedan los procesos de velocidad, como se definirá después con más detalle.

EJEMPLO 5-3

Energía de activación para átomos intersticiales

Suponga que se determina que los átomos intersticiales pasan de un sitio a otro a velocidades de 5×10^8 saltos/s a 500°C , y a 8×10^{10} saltos/s a 800°C . Calcule Q , la energía de activación para el proceso.

SOLUCIÓN

La figura 5-8 representa los datos en una gráfica de $\ln(\text{velocidad})$ en función de $1/T$; la pendiente de esta línea, calculada en la figura, resulta $Q/R = 14000\text{ K}^{-1}$, o $Q = 27880\text{ cal/mol}$. También se podrían escribir dos ecuaciones simultáneas:

$$\begin{aligned} \text{Velocidad} \left(\frac{\text{saltos}}{\text{s}} \right) &= c_0 \exp \left(\frac{-Q}{RT} \right) \\ 5 \times 10^8 \left(\frac{\text{saltos}}{\text{s}} \right) &= c_0 \left(\frac{\text{saltos}}{\text{s}} \right) \exp \left[\frac{-Q \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}} \right)}{\left[1.987 \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right) \right] (500 + 273) \text{K}} \right] \\ &= c_0 \exp (-0.000651Q) \\ 8 \times 10^{10} \left(\frac{\text{saltos}}{\text{s}} \right) &= c_0 \left(\frac{\text{saltos}}{\text{s}} \right) \exp \left[\frac{-Q \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}} \right)}{\left[1.987 \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right) \right] (800 + 273) \text{K}} \right] \\ &= c_0 \exp (-0.000469Q) \end{aligned}$$

Obsérvese que las temperaturas se convirtieron a K.

Ya que

$$c_0 = \frac{5 \times 10^8}{\exp (-0.000651Q)} \left(\frac{\text{saltos}}{\text{s}} \right),$$

entonces

$$8 \times 10^{10} = \frac{(5 \times 10^8) \exp(-0.000469Q)}{\exp(-0.000651Q)}$$

$$160 = \exp[(0.000651 - 0.000469)Q] = \exp(0.000182Q)$$

$$\ln(160) = 5.075 = 0.000182Q$$

$$Q = \frac{5.075}{0.000182} = 27\,880 \text{ cal/mol}$$

5-3

Mecanismos de la difusión

Como se vio en el capítulo 4, en los materiales existen defectos llamados vacancias. El desorden que crean esas vacancias (es decir, la mayor entropía) ayuda a minimizar la energía libre y, en consecuencia, la estabilidad termodinámica de un material cristalino. Los materiales cristalinos también contienen otras clases de defectos. En materiales que contienen vacancias, los átomos se mueven o "saltan" de una posición en la red a otra. Este proceso se llama **autodifusión** y se puede detectar con trazadores radiactivos. Por ejemplo, imaginemos que

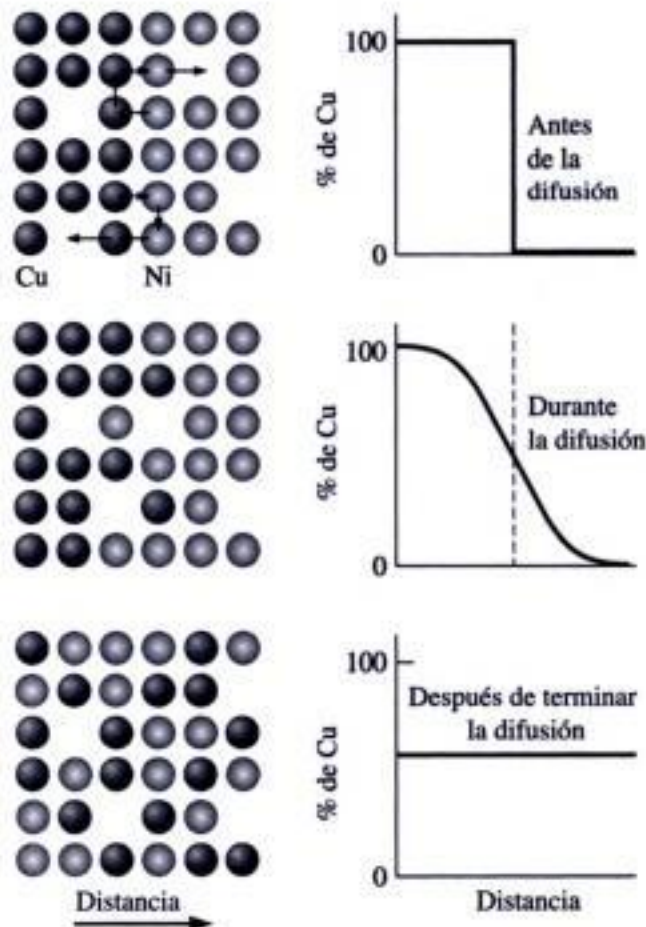


Figura 5-10
Difusión de átomos de cobre en níquel. Al final, los átomos de cobre se distribuyen al azar dentro del níquel.

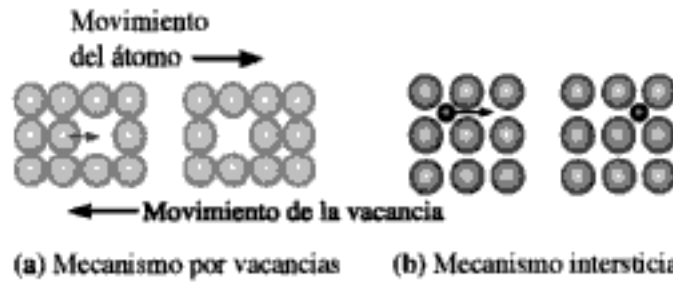


Figura 5-11
Mecanismos de difusión en los materiales: (a) difusión de vacancia o de átomo sustitucional; (b) difusión intersticial.

se incorpora un isótopo radiactivo de oro (Au^{198}) sobre la superficie de oro normal (Au^{197}). Después de cierto tiempo, los átomos radiactivos pasarán al interior del oro normal. Al final, los átomos radiactivos estarían distribuidos uniformemente en toda la muestra de oro normal. Aunque la autodifusión sucede en forma continua en todos los materiales, en general no es apreciable su efecto sobre el comportamiento del material.

También existe la difusión de átomos distintos en los materiales (Fig. 5-10). Imagine el lector una lámina de níquel ligada a una lámina de cobre. A temperaturas altas, los átomos de níquel se difunden en forma gradual por el cobre, y los átomos de cobre migran al níquel. De nuevo, al final los átomos de cobre y níquel quedan distribuidos uniformemente. Hay dos mecanismos importantes por los que se pueden difundir los átomos o los iones (Fig. 5-11).

Difusión de vacancias En la autodifusión y en la difusión de átomos sustitucionales, un átomo deja su sitio de red y llena una vacancia cercana (con lo que se crea una vacancia nueva en el sitio de red original). Al continuar la difusión, se forman flujos de átomos y vacancias a contracorriente, lo que se llama **difusión de vacancias**. La cantidad de vacancias, que aumenta con la temperatura, ayuda a determinar el grado de autodifusión y también de difusión de átomos sustitucionales.

Difusión intersticial Cuando en la estructura cristalina hay un átomo o ion intersticial pequeño, se mueve de un sitio intersticial a otro. En este mecanismo no se requieren vacancias. En parte porque hay mucho más sitios intersticiales que vacancias, la difusión intersticial sucede con más facilidad que la difusión de vacancias. Los átomos intersticiales que son relativamente más pequeños se pueden difundir con mayor rapidez. En el capítulo 3 hemos visto que muchas cerámicas con enlace iónico se pueden considerar como con empaquetamiento compacto de aniones con cationes en los sitios intersticiales. En esos materiales, con frecuencia los cationes más pequeños se difunden con más rapidez que los aniones más grandes.

Un átomo que se difunde debe oprimir o forzar a los átomos que lo rodean en su paso para alcanzar su nuevo sitio. Para que esto suceda, se debe suministrar energía, para forzar al átomo a su nueva posición, como se muestra en el esquema de la figura 5-12, para diffusiones de vacancias e intersticios. El átomo se encuentra originalmente en un lugar de baja energía y relativamente estable. Para pasar a un nuevo lugar, el átomo debe superar una barrera de energía; esta barrera es la energía de activación Q . La energía térmica suministra a los átomos o iones la energía necesaria para superar esta barrera. Obsérvese que con frecuencia se usa el símbolo Q para indicar energías de activación de distintos procesos (velocidad de saltos de átomos, velocidad de reacción química, energía necesaria para producir vacancias, etc.) y se debe tener cuidado para comprender el proceso o fenómeno específico al que se está aplicando el término general Q de energía de activación, porque su valor depende del fenómeno en particular.

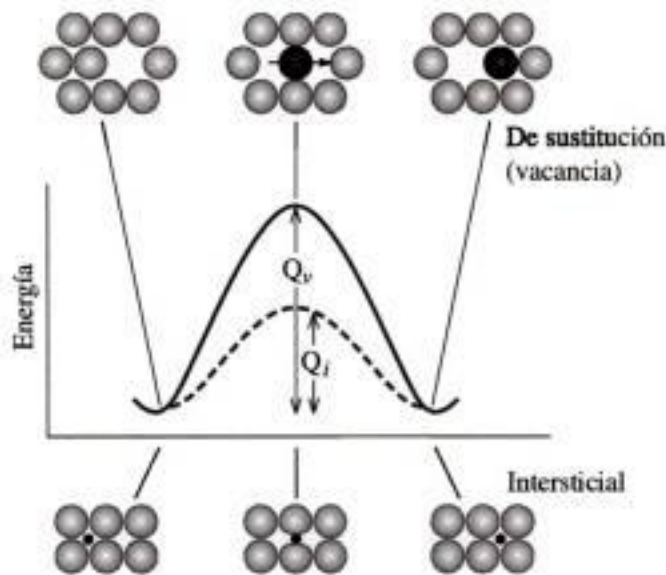


Figura 5-12

Se requiere gran energía para forzar los átomos durante la difusión. Ésta es la energía de activación Q . En general, se requiere más energía para un átomo sustitucional que para uno intersticial.

Normalmente, se requiere menos energía para forzar un átomo intersticial a través de los átomos que lo rodean; en consecuencia, las energías de activación son menores para la difusión intersticial que para la de vacancias. Una buena analogía es la siguiente: en el básquetbol, los jugadores relativamente pequeños y menos altos pueden "difundirse" con más rapidez, pasando entre jugadores más altos y grandes, y anotar puntos (Fig. 5-13). Los valores característicos de energías de activación para difusión de átomos diferentes en distintos materiales se muestran en la tabla 5-1. Se usará el término **par de difusión** para indicar una combinación de un átomo de determinado elemento (por ejemplo, carbono) que se difunde por un material



Figura 5-13 En el básquetbol, los jugadores más pequeños se pueden "difundir" por los espacios abiertos entre los jugadores más grandes.

TABLA 5-1 ■ Datos de difusión para algunos materiales

Par de difusión	Q (cal/mol)	D_0 (cm ² /s)
Difusión intersticial:		
C en hierro FCC	32 900	0.23
C en hierro BCC	20 900	0.011
N en hierro FCC	34 600	0.0034
N en hierro BCC	18 300	0.0047
H en hierro FCC	10 300	0.0063
H en hierro BCC	3 600	0.0012
Autodifusión (difusión de vacancias):		
Pb en Pb FCC	25 900	1.27
Al en Al FCC	32 200	0.10
Cu en Cu FCC	49 300	0.36
Fe en Fe FCC	66 700	0.65
Zn en Zn HCP	21 800	0.1
Mg en Mg HCP	32 200	1.0
Fe en Fe BCC	58 900	4.1
W en W BCC	143 300	1.88
Si en Si (covalente)	110 000	1 800.0
C en C (covalente)	163 000	5.0
Difusión heterogénea (difusión de vacancias):		
Ni en Cu	57 900	2.3
Cu en Ni	61 500	0.65
Zn en Cu	43 900	0.78
Ni en hierro FCC	64 000	4.1
Au en Ag	45 500	0.26
Ag en Au	40 200	0.072
Al en Cu	39 500	0.045
Al en Al ₂ O ₃	114 000	28.0
O en Al ₂ O ₃	152 000	1 900.0
Mg en MgO	79 000	0.249
O en MgO	82 100	0.000043

Tomado de varias fuentes, incluyendo Adda, Y y Philibert, J., *La Diffusion dans les Solides*, vol. 2, 1966.

anfitrión (por ejemplo, Fe-BCC). Una energía de activación baja indica que la difusión es fácil. En la autodifusión, la energía de activación es igual a la necesaria para crear una vacancia y causar el movimiento del átomo. La tabla 5-1 muestra también valores de D_0 , el término antes del exponente, y la constante c_0 de la ecuación 5-1, donde el proceso es de difusión. Más adelante veremos que D_0 es el coeficiente de difusión cuando $1/T = 0$.

5-5

Velocidad de difusión [primera ley de Fick]

Adolf Eugen Fick (1829-1901) fue el primer científico que presentó una descripción cuantitativa del proceso de difusión. ¡Es interesante que Fick, también fue el primero en experimentar con lentes de contacto en animales, y el primero en implantar un lente de contacto en ojos humanos en 1887-1888!

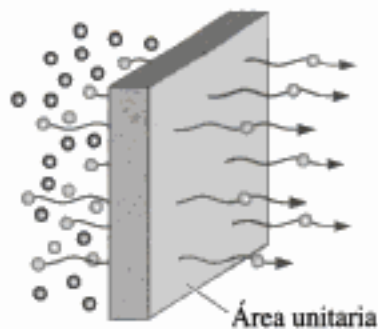


Figura 5-14

El flujo durante la difusión se define como la cantidad de átomos que atraviesan un plano de unidad de área por unidad de tiempo.

La velocidad con que se difunden los átomos, iones, partículas u otras especies en un material se puede medir con el **flujo** J . Lo que aquí interesa principalmente es la difusión de iones o átomos. El flujo J se define como la cantidad de átomos que atraviesan un plano o un área unitaria por unidad de tiempo (Fig. 5-14). La **primera ley de Fick** explica el flujo neto de átomos:

$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad (5-3)$$

en donde J es el flujo, D es la **difusividad** o **coeficiente de difusión** ($\frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$) y dc/dx es el **gradiente de concentración** ($\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}}$). Dependiendo del caso, la concentración se puede expresar en porcentaje de átomos (% at.), porcentaje en peso (% en peso), porcentaje molar (% mol), fracción de átomos o fracción mol. Las unidades del gradiente de concentración y de flujo también cambian en forma correspondiente.

Durante la difusión, varios factores afectan el flujo de átomos. Si se maneja difusión de iones, electrones, huecos, etc., las unidades de J , D y $\frac{dc}{dx}$ reflejan las clases adecuadas que se estén considerando. El signo negativo en la ecuación 5-3 indica que el flujo de las especies que se difunden es de concentraciones mayores a menores, haciendo que el signo de $\frac{dc}{dx}$ sea negativo; en consecuencia, J es positivo. La energía térmica asociada con los átomos, iones, etc., causa movimiento aleatorio de los átomos. A escala microscópica, la fuerza termodinámica impulsora de la difusión es el gradiente de concentración. Se produce un flujo neto u observable dependiendo de la temperatura y del gradiente de concentración.

Gradiente de concentración El gradiente de concentración indica la forma en que la composición del material varía en función de la distancia: Δc es la diferencia de concentración a través de la distancia Δx (Fig. 5-15). Se puede producir un gradiente de concentración cuando se ponen en contacto dos materiales de distinta composición, cuando están en contacto un gas o un líquido con un sólido, cuando en un material se producen estructuras en desequilibrio debido al procesamiento y por muchas otras causas.

El flujo a determinada temperatura sólo es constante si el gradiente de concentración también lo es, esto es, si las composiciones a cada lado del plano de la figura 5-14 permanecen invariables. Sin embargo, en muchos casos reales esas composiciones varían, a medida que los átomos se redistribuyen y, en consecuencia, también cambia el flujo. Con frecuencia se observa que el flujo al principio es alto y después decrece en forma gradual, a medida que la difusión reduce al gradiente de concentración. Los siguientes ejemplos ilustran los cálculos del flujo y de los gradientes de concentración en la difusión de dopantes en semiconductores y cerámicas, pero sólo para el caso de gradiente de concentración constante. Después, en este capítulo, se examinará la difusión en estado no estacionario con ayuda de la segunda ley de Fick.

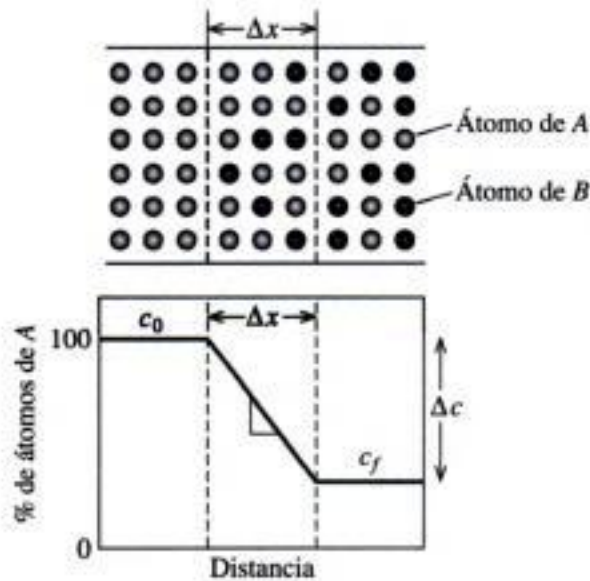


Figura 5-15
Ilustración del gradiente
de concentración.

EJEMPLO 5-4 Dopado de semiconductor

Una forma de fabricar transistores que amplifican las señales eléctricas es difundir átomos como impureza en un material semiconductor, como el silicio (Si). Suponga que una oblea de silicio tiene 0.1 cm de espesor, que originalmente contiene un átomo de fósforo por cada 10 millones de átomos de Si, y que se trata de tal modo que haya 400 átomos de fósforo (P) por cada 10 millones de átomos de Si en la superficie (Fig. 5-16). Calcule el gradiente de concentración a) en porcentaje atómico/cm y b) en $\left(\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^2 \cdot \text{cm}}\right)$. El parámetro de red del silicio es 5.4307 Å.

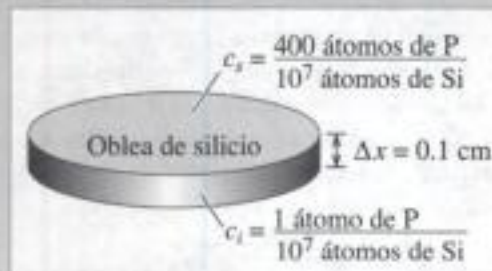


Figura 5-16
Oblea de silicio con variación en la
concentración de átomos de P (para el
ejemplo 5-4).

SOLUCIÓN

Primero se calcularán las composiciones inicial y de la superficie en porcentaje atómico (% at.):

$$c_i = \frac{1 \text{ átomo de P}}{10^7 \text{ átomos}} \times 100 = 0.00001 \text{ de \% de P}$$

$$c_s = \frac{400 \text{ átomos de P}}{10^7 \text{ átomos}} \times 100 = 0.004 \text{ de \% de P}$$

$$\frac{\Delta c}{\Delta x} = \frac{0.00001 - 0.004 \text{ a \% P}}{0.1 \text{ cm}} = -0.0399 \frac{\text{de \% de P}}{\text{cm}}$$

Para determinar el gradiente en unidades $\left(\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}}\right)$, se debe calcular el volumen de la celda unitaria:

$$V_{\text{celda}} = (5.4307 \times 10^{-8} \text{ cm})^3 = 1.6 \times 10^{-22} \frac{\text{cm}^3}{\text{celda}}$$

El volumen ocupado por 10^7 átomos de Si, arreglados en estructura cúbica de diamante (DC) con 8 átomos/celda es:

$$V = \left[\frac{10^7 \text{ átomos}}{8 \frac{\text{átomos}}{\text{celda}}} \right] \left[1.6 \times 10^{-22} \left(\frac{\text{cm}^3}{\text{celda}} \right) \right] = 2 \times 10^{-16} \text{ cm}^3$$

Las composiciones en átomos/cm³ son:

$$c_i = \frac{1 \text{ átomo de P}}{2 \times 10^{-16} \text{ cm}^3} = 0.005 \times 10^{18} \left(\frac{\text{átomos de P}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$c_s = \frac{400 \text{ átomos de P}}{2 \times 10^{-16} \text{ cm}^3} = 2 \times 10^{18} \left(\frac{\text{átomos de P}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$\frac{\Delta c}{\Delta x} = \frac{0.005 \times 10^{18} - 2 \times 10^{18} \left(\frac{\text{átomos de P}}{\text{cm}^3} \right)}{0.1 \text{ cm}}$$

$$= -1.995 \times 10^{19} \frac{\text{átomos de P}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}}$$

EJEMPLO 5-5

Difusión del níquel en óxido de magnesio (MgO)

Se deposita una capa de 0.05 cm de óxido de magnesio (MgO) entre capas de níquel (Ni) y tantalio (Ta) para formar una barrera que evite reacciones entre los dos metales (Fig. 5-17). A 1400 °C, se forman iones níquel y se difunden a través de la cerámica de MgO y llegan al tantalio. Determine la cantidad de iones níquel que atraviesan el MgO cada segundo. El coeficiente de difusión de los iones níquel en MgO es $9 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$ y el parámetro de red del níquel a 1400 °C es $3.6 \times 10^{-8} \text{ cm}$.

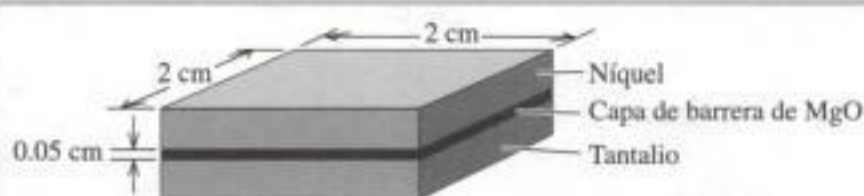


Figura 5-17 Par de difusión (para el ejemplo 5-5).

SOLUCIÓN

La composición del níquel en la interfaz Ni/MgO es 100% Ni, o sea

$$c_{\text{Ni/MgO}} = \frac{4 \frac{\text{átomos de Ni}}{\text{celda unitaria}}}{(3.6 \times 10^{-8} \text{ cm})^3} = 8.57 \times 10^{22} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3}$$

La composición de níquel en la interfaz Ta/MgO es 0% Ni. Entonces, el gradiente de concentración es:

$$\frac{\Delta c}{\Delta x} = \frac{0 - 8.57 \times 10^{22} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3}}{0.05 \text{ cm}} = -1.71 \times 10^{24} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}}$$

El flujo de átomos de níquel a través de la capa de MgO es:

$$J = -D \frac{\Delta c}{\Delta x} = (9 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}) (-1.71 \times 10^{24} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}})$$

La cantidad total de átomos de níquel que cruza la interfaz de 2 cm × 2 cm cada segundo es:

$$\begin{aligned} \text{Total de átomos de Ni por segundo} &= (J)(\text{Área}) = (1.54 \times 10^{13} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}})(2 \text{ cm})(2 \text{ cm}) \\ &= 6.16 \times 10^{13} \text{ átomos de níquel/s} \end{aligned}$$

Aunque parece muy rápida, se observa que el volumen de átomos de Ni removidos en un segundo de la interfaz Ni/MgO es:

$$\frac{6.16 \times 10^{13} \frac{\text{átomos de Ni}}{\text{cm}^2}}{8.57 \times 10^{22} \frac{\text{átomos de Ni}}{\text{cm}^3}} = 0.72 \times 10^{-9} \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

O bien, el espesor en que se reduce la capa de níquel cada segundo es:

$$\frac{0.72 \times 10^{-9} \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}}{4 \text{ cm}^2} = 1.8 \times 10^{-10} \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Para que salga un micrómetro (o micra, 10^{-4} cm) de níquel, el tratamiento debe durar

$$\frac{10^{-4} \text{ cm}}{1.8 \times 10^{-10} \frac{\text{cm}}{\text{s}}} = 556\,000 \text{ s} = 154 \text{ h}$$

5-6

Factores que afectan la difusión

Temperatura y el coeficiente de difusión La cinética del proceso de difusión depende fuertemente de la temperatura. El coeficiente de difusión D se relaciona con la temperatura, de acuerdo con una ecuación de tipo Arrhenius,

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (5-4)$$

donde Q es la energía de activación (en cal/mol) de la difusión de las especies que se consideran (por ejemplo, Al en Si), R es la constante universal de los gases ideales, $(1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}})$ y T es la temperatura absoluta (K). D_0 es el término preexponencial semejante a c_0 en la ecuación 5-1.

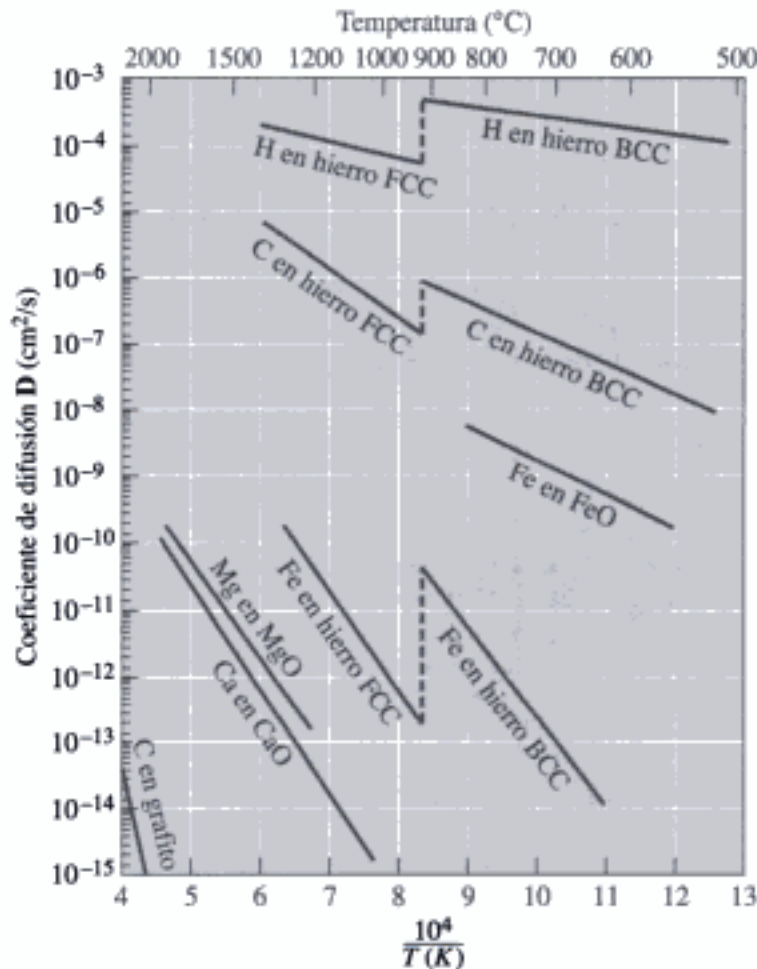


Figura 5-18 Coeficiente de difusión D en función del recíproco de la temperatura para algunos metales y cerámicos. En esta gráfica de Arrhenius, D representa la rapidez del proceso de difusión. Una pendiente grande indica una alta energía de activación.

Ésta es una constante para un sistema de difusión dado, y es igual al valor del coeficiente de difusión cuando $1/T = 0$ o $T = \infty$. En la tabla 5-1 se observan valores característicos de D_0 , y la dependencia entre D y la temperatura se muestra en la figura 5-18 para algunos metales y cerámicos. Los materiales con enlace covalente, como el carbono y el silicio (tabla 5-1), tienen energías de activación excepcionalmente altas, de acuerdo con la alta resistencia de sus enlaces atómicos. La figura 5-19 muestra los coeficientes de difusión de diversos dopantes en el silicio.[5]

En los materiales iónicos, como algunos óxidos cerámicos, un ion que se difunde sólo ocupa un sitio que tenga la misma carga. Para llegar a ese sitio, el ion debe forzar los iones vecinos que estén a su paso, pasar por una región de carga opuesta y moverse una distancia relativamente grande (Fig. 5-20). En consecuencia, las energías de activación son altas y las tasas de difusión son menores para los materiales iónicos que para los metales. (Fig. 5-21).[6] Esto se aprovecha en muchos casos. Por ejemplo, en el procesamiento del silicio (Si) se forma una capa delgada de sílice (SiO_2) sobre una oblea de silicio (capítulo 18). A continuación, se forma una ventana eliminando una parte de la capa de sílice. Esa ventana permite la difusión selectiva de átomos dopantes, como fósforo (P) y boro (B). Sin embargo, la capa de sílice es esencialmente impermeable a los átomos dopantes. Sin embargo, la difusión más lenta en la mayoría de los óxidos y otros cerámicos es normalmente desventajosa, debido a que se necesitan

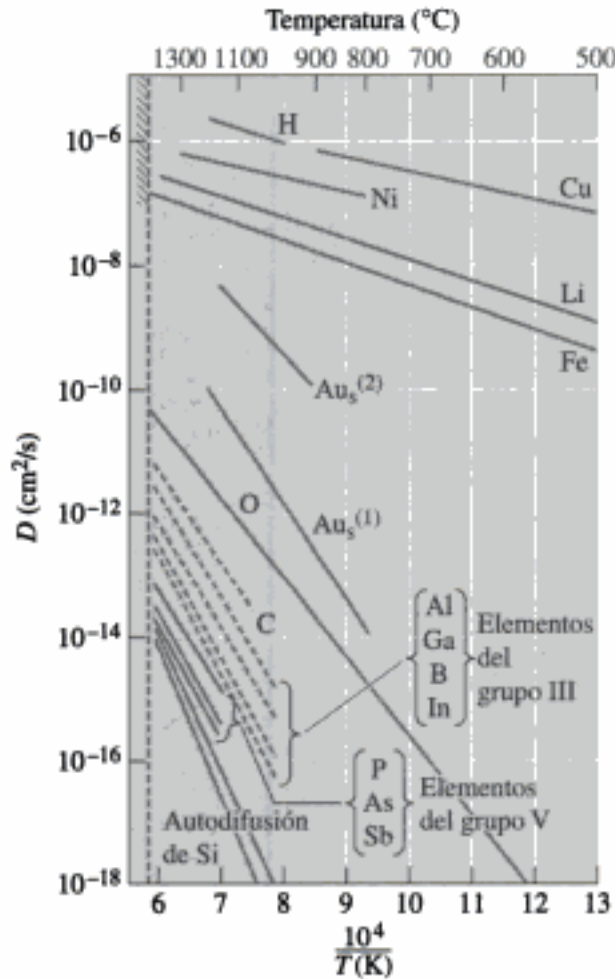


Figura 5-19
Coeficientes de difusión para distintos dopantes en silicio. (Fuente: tomado de "Diffusion and Diffusion Induced Defects in Silicon", por U. Gösele. En R. Bloor, M. Flemings y S. Mahajan (Eds.), Encyclopedia of Advanced Materials, vol. 1, 1994, p. 631, fig. 2. Copyright © 1994, Pergamon Press. Reproducido con autorización de los autores.)

mayores temperaturas en su procesamiento. Sin embargo, es una ventaja en aplicaciones en las que se requiere que los componentes resistan altas temperaturas.

Cuando aumenta la temperatura de un material, el coeficiente de difusión D aumenta (según la ecuación 5-4) y, en consecuencia, también aumenta el flujo de átomos. A mayores temperaturas, la energía térmica suministrada a los átomos que se difunden les permite superar la barrera de energía de activación y moverse con más facilidad hacia nuevos sitios en los arreglos atómicos. A bajas temperaturas, que con frecuencia son menores que 0.4 veces la temperatura absoluta de fusión del material, la difusión es muy lenta y podrá no ser importante. Por esta razón, el tratamiento térmico de metales y el procesamiento de cerámicos se efectúan a altas temperaturas, cuando los átomos se mueven con la rapidez necesaria para completar las

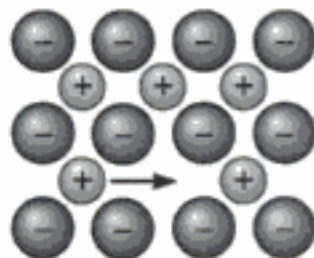


Figura 5-20
Difusión en compuestos iónicos. Sólo los aniones pueden entrar en otros sitios de anión. Los cationes, más pequeños, tienden a difundirse con más rapidez.

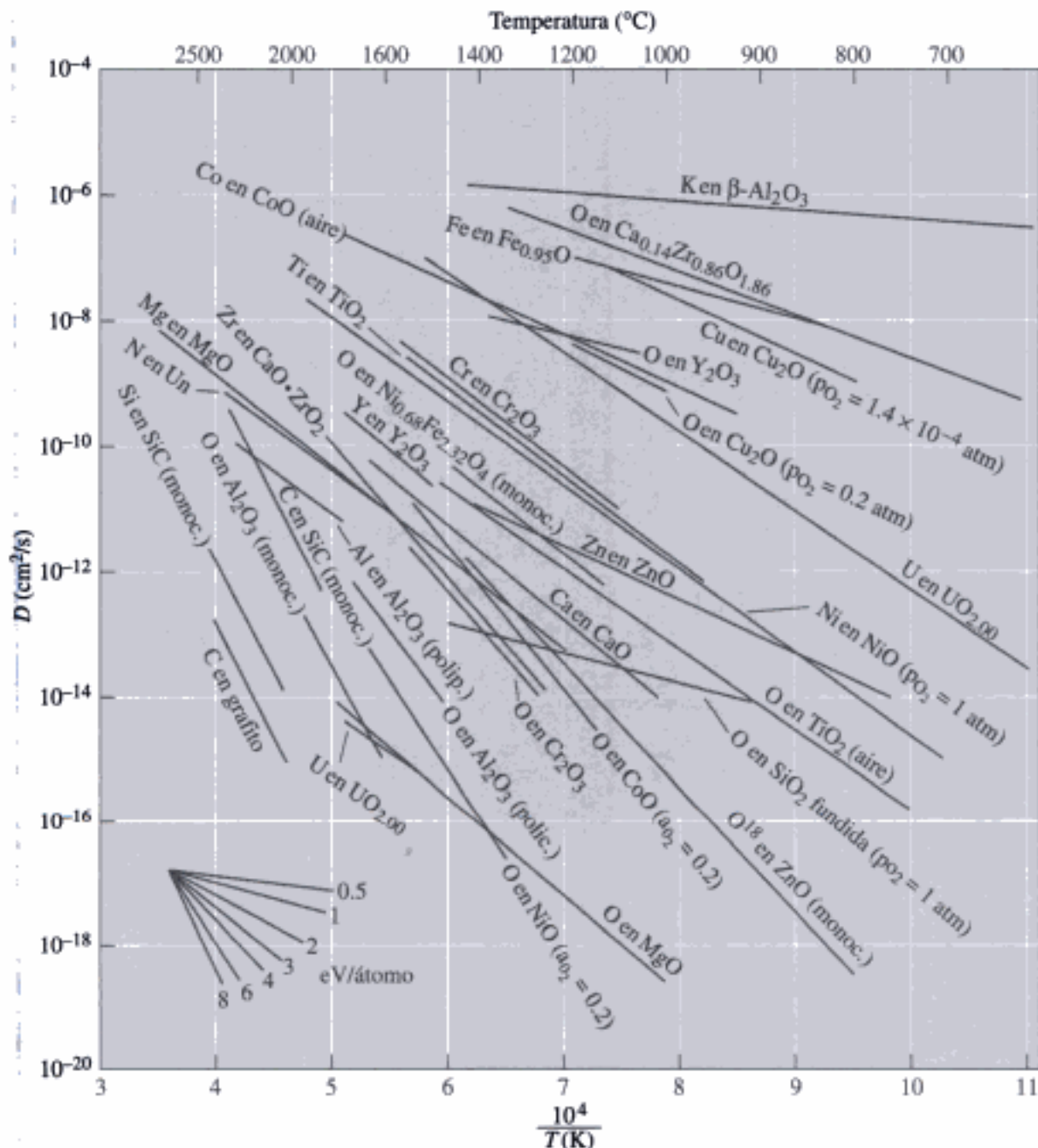


Figura 5-21 Coeficientes de difusión de iones en distintos óxidos. (Fuente: Adaptado de Physical Ceramics: Principles for Ceramic Science and Engineering, por Y.M. Chiang, D. Birnie y W.D. Kingery, fig. 3-1. Copyright © 1997, John Wiley & Sons. Adaptado con autorización.)

reacciones o alcanzar las condiciones de equilibrio. Como se requiere menos energía térmica para superar la menor barrera de energía de activación, una energía de activación Q más pequeña incrementa el coeficiente de difusión y el flujo. El siguiente ejemplo ilustra la aplicación de la primera ley de Fick y de los conceptos relacionados con la dependencia entre D y la temperatura para diseñar una membrana de hierro.

EJEMPLO 5-6

Diseño de una membrana de hierro

Un cilindro impermeable de 3 cm de diámetro y 10 cm de longitud contiene un gas formado con 0.5×10^{20} átomos de N por cm^3 y 0.5×10^{20} átomos de H por cm^3 , en uno de los lados de una membrana de hierro (Fig. 5-22). El gas se introduce al tubo en forma continua, para asegurar que las concentraciones de nitrógeno y de hidrógeno sean constantes. Al otro lado de la membrana, el gas está constituido por 1×10^{18} átomos de N por cm^3 y 1×10^{18} átomos de H por cm^3 . Todo el sistema debe funcionar a 700°C , temperatura a la cual el hierro tiene estructura BCC. Diseñe una membrana de hierro que no permita una pérdida de nitrógeno mayor que 1% por hora a través de la membrana y que permita pasar a través de ella al 90% del hidrógeno cada hora.

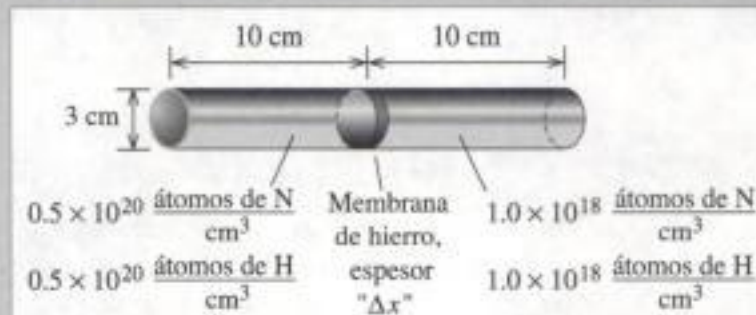


Figura 5-22 Diseño de una membrana de hierro (para el ejemplo 5-6).

SOLUCIÓN

La cantidad total de átomos de nitrógeno en el recipiente es:

$$(0.5 \times 10^{20} \text{ N/cm}^3) (\pi/4) (3 \text{ cm})^2 (10 \text{ cm}) = 35.343 \times 10^{20} \text{ átomos de N.}$$

La cantidad máxima de átomos de N que se deben perder es 1% de este total, es decir:

$$\text{Átomos de N perdidos por h} = (0.01) (35.34 \times 10^{20}) = 35.343 \times 10^{18} \text{ átomos de N/h}$$

$$\text{Átomos de N perdidos por s} = (35.343 \times 10^{18} \text{ átomos de N/h}) / (3600 \text{ s/h})$$

$$= 0.0098 \times 10^{18} \text{ átomos de N/s.}$$

Entonces, el flujo es:

$$J = \frac{0.0098 \times 10^{18} (\text{N átomos/s})}{\left(\frac{\pi}{4}\right) (3 \text{ cm})^2}$$

$$= 0.00139 \times 10^{18} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

El cálculo del coeficiente de difusión del nitrógeno en el hierro BCC a $700^\circ\text{C} = 973 \text{ K}$ es:

De acuerdo con la ecuación 5-4 y la tabla 5-1:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$$

$$D_N = 0.0047 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \exp\left[\frac{-18,300 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}}{1.987 \frac{\text{cal}}{\text{K}\cdot\text{mol}} (973) \text{ K}}\right]$$

$$= 0.0047 \exp(-9.4654) = (0.0047)(7.749 \times 10^{-5}) = 3.64 \times 10^{-7} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

Según la ecuación 5-3:

$$J = -D \left(\frac{\Delta c}{\Delta x}\right) = 0.00139 \times 10^{18} \frac{\text{átomos de N}}{\text{cm}^2\cdot\text{s}}$$

$$\Delta x = -D\Delta c/J = \frac{[(-3.64 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s})(1 \times 10^{18} - 50 \times 10^{18} \frac{\text{átomos de N}}{\text{cm}^3})]}{0.00139 \times 10^{18} \frac{\text{átomos de N}}{\text{cm}^2\cdot\text{s}}}$$

$$\Delta x = 0.0128 \text{ cm} = \text{espesor mínimo de la membrana}$$

De forma parecida se calcula el espesor de la membrana que permita pasar al 90% del hidrógeno:

$$\text{Pérdida de átomos de H por h} = (0.90) (35.343 \times 10^{20}) = 31.80 \times 10^{20}$$

$$\text{Pérdida de átomos de H por s} = 0.0088 \times 10^{20}$$

$$J = 0.125 \times 10^{18} \frac{\text{átomos de H}}{\text{cm}^2\cdot\text{s}}$$

De la ecuación 5-4,

$$D_H = 0.004 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \exp\left[\frac{-18,300 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}}{1.987 \frac{\text{cal}}{\text{K}\cdot\text{mol}} (973) \text{ K}}\right] = 1.86 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$$

Ya que

$$\Delta x = -D \Delta c/J$$

$$\Delta x = \frac{(1.86 \times 10^{-4} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}})(49 \times 10^{18} \frac{\text{átomos de H}}{\text{cm}^3})}{0.125 \times 10^{18} \frac{\text{átomos de H}}{\text{cm}^2\cdot\text{s}}}$$

$$= 0.0729 \text{ cm} = \text{espesor máximo}$$

Una membrana de hierro con espesor entre 0.0128 cm y 0.0729 cm será satisfactoria.

TABLA 5-2 ■ Efecto del tipo de difusión para torio en tungsteno y para autodifusión en plata*

Tipo de difusión	Coeficiente de difusión (D)			
	Torio en tungsteno		Plata en plata	
	D_0 cm ² /s	Q cal/mol	D_0 cm ² /s	Q cal/mol
Superficie	0.47	66 400	0.068	8 900
Límite de grano	0.74	90 000	0.24	22 750
Volumen	1.00	120 000	0.99	45 700

* Parámetros para la ecuación 5-4.

Clases de difusión En la **difusión volumétrica**, los átomos se mueven a través del cristal, de un sitio regular o intersticial a otro. A causa de los átomos vecinos, la energía de activación es grande y la velocidad de difusión es relativamente lenta.

Sin embargo, los átomos también se pueden difundir a lo largo de los límites, interfaces y superficies del material. Los átomos se difunden fácilmente por **difusión en límite de grano** porque el empaquetamiento de átomos es malo en esas zonas. Como los átomos pueden abrirse camino con mayor facilidad a través del límite desordenado del grano, la energía de activación es baja (tabla 5-2). La **difusión superficial** es todavía más fácil, porque en la superficie hay menores restricciones para los átomos que se difunden.

Tiempo La difusión requiere tiempo; las unidades del flujo ¡son $\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$! Si se debe difundir una gran cantidad de átomos para producir una estructura uniforme, se podrán necesitar tiempos largos, aun a altas temperaturas. Los tiempos de los tratamientos térmicos se pueden reducir usando temperaturas mayores o haciendo lo más pequeñas que sea posible las **distancias de difusión** (relacionadas con Δx).

Se observa que se obtienen estructuras y propiedades notables si se evita la difusión. Los aceros se templean con rapidez desde altas temperaturas para evitar la difusión desde estructuras en desequilibrio, lo que proporciona la base de complicados tratamientos térmicos. De igual modo, para formar vidrios metálicos (capítulo 4), se deben temprar los metales líquidos a una tasa de enfriamiento muy alta ($\sim 10^6$ °C/segundo). Esto es para evitar la difusión de átomos retirando su energía térmica y promoviendo su ordenamiento en arreglos amorfos en desequilibrio. Los fundidos de vidrios de silicato, por otra parte, son viscosos y la difusión de iones a través de ellos es lenta. En consecuencia, no se necesita enfriar esos fundidos con mucha rapidez. Existe el mito de que en muchos edificios antiguos hay vidrios de ventana que son más gruesos en su parte inferior que en su parte superior, porque el vidrio ha bajado a través de los años. Con base en la cinética de la difusión, se puede demostrar que aun varios cientos o miles de años no serán suficientes para causar ese flujo en los vidrios, cerca de la temperatura ambiente. En ciertos procesos de deposición de películas delgadas, como por ejemplo la pulverización catódica, se obtienen a veces películas delgadas amorfas o microcristalinas, si los átomos o los iones se enfrían con rapidez después de haberse depositado en el sustrato. Si a continuación esas películas se calientan (después de depositarlas) a temperaturas suficientemente altas, sucederá la difusión y las películas delgadas amorfas terminarán por cristalizar. Ya vimos antes (Fig. 5-3) cómo se recuecen las películas delgadas depositadas por pulverización, para discos duros, con objeto de causar la difusión de átomos de cromo hacia los límites de grano. En el siguiente ejemplo se examinarán distintos mecanismos de la difusión.

EJEMPLO 5-7**Par de difusión tungsteno-torio**

Imagine un conjunto de par de difusión entre tungsteno puro y una aleación de tungsteno con 1% de átomos de torio. Después de exponerlo varios minutos a 2000 °C, se establece una zona de transición de 0.01 cm de espesor. ¿Cuál es el flujo de los átomos de torio en ese momento, si la difusión se debe: a) difusión en volumen, b) difusión en límite de grano y c) difusión en la superficie? (Véase la tabla 5-2).

SOLUCIÓN

El parámetro de red del tungsteno BCC es 3.165 Å aproximadamente. Entonces, la cantidad de átomos de tungsteno/cm³ es:

$$\frac{\text{átomos de W}}{\text{cm}^3} = \frac{2 \text{ átomos/celda}}{(3.165 \times 10^{-8})^3 \text{ cm}^3/\text{celda}} = 6.3 \times 10^{22}$$

En la aleación de tungsteno-torio con 1% de átomos de Th la cantidad de átomos de torio es:

$$c_{\text{Th}} = (0.01) (6.3 \times 10^{22}) = 6.3 \times 10^{20} \text{ átomos de Th/cm}^3$$

En el tungsteno puro, la cantidad de átomos de torio es cero; entonces, el gradiente de concentración es:

$$\frac{\Delta c}{\Delta x} = \frac{0 - 6.3 \times 10^{20} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3}}{0.01 \text{ cm}} = -6.3 \times 10^{22} \frac{\text{átomos de Th}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}}$$

1. Difusión en volumen

$$D = 1.0 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \exp \left(\frac{-120\,000 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}}{(1.987 \frac{\text{cal}}{\text{K} \cdot \text{mol}})(2273 \text{ K})} \right) = 2.89 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$\begin{aligned} J &= -D \frac{\Delta c}{\Delta x} = -(2.89 \times 10^{-12} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}) (-6.3 \times 10^{22} \frac{\text{átomos de Th}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}}) \\ &= 18.2 \times 10^{10} \frac{\text{átomos de Th}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \end{aligned}$$

2. Difusión en límites de grano

$$D = 0.74 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \exp \left(\frac{-90\,000 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}}{(1.987 \frac{\text{cal}}{\text{K} \cdot \text{mol}})(2273 \text{ K})} \right) = 1.64 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$J = -(1.64 \times 10^{-9} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}) (-6.3 \times 10^{22} \frac{\text{átomos de Th}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}}) = 10.3 \times 10^{13} \frac{\text{átomos de Th}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

3. Difusión en la superficie

$$D = 0.47 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \exp \left(\frac{-66\,400 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}}{(1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}})(2273 \text{ K})} \right) = 1.94 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$J = -(1.94 \times 10^{-7} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}) (-6.3 \times 10^{22} \frac{\text{átomos de Th}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}}) = 12.2 \times 10^{15} \frac{\text{átomos de Th}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

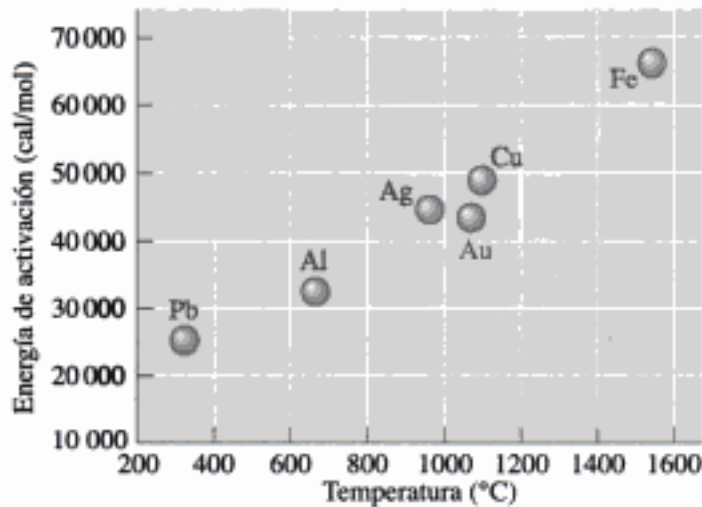


Figura 5-23
La energía de activación para la autodifusión se incrementa al aumentar el punto de fusión del metal.

Dependencia entre enlace y estructura cristalina Hay varios factores que influyen en la energía de activación de la difusión y, en consecuencia, en la velocidad de difusión. La difusión intersticial, con su baja energía de activación, normalmente se efectúa con mayor rapidez que la difusión por vacancias o de difusión sustitucional. Normalmente, las energías de activación son menores para átomos que se difunden a través de estructuras cristalinas abiertas, en comparación con estructuras de empaquetamiento compacto. Debido a que la energía de activación depende de la fuerza del enlace atómico, su valor es mayor para la difusión de átomos en materiales con alta temperatura de fusión (Fig. 5-23).

También se encuentra que los cationes (con carga positiva), con su menor tamaño, suelen tener mayores coeficientes de difusión que los aniones (con carga negativa). Por ejemplo, en el cloruro de sodio la energía de activación para difusión de iones de cloro (Cl^-) es aproximadamente el doble que para difusión de iones sodio (Na^+).

La difusión de iones también permite una transferencia de carga eléctrica; de hecho, la conductividad de los materiales cerámicos con enlace iónico se relaciona con la temperatura a través de una ecuación de Arrhenius. Al aumentar la temperatura, los iones se difunden con mayor rapidez, la carga eléctrica se transfiere con más rapidez y aumenta la conductividad eléctrica. Como se dijo antes, se trata de ejemplos de materiales cerámicos que son buenos conductores de electricidad.

Dependencia entre la concentración de la especie que se difunde y la composición de la matriz El coeficiente de difusión (D) no sólo depende de la temperatura, de acuerdo con la ecuación 5-4, sino también de la concentración de la especie que se difunde y de la composición de la matriz. Estos efectos no se han incluido hasta ahora en nuestra descripción. En muchos casos, se puede ignorar la dependencia de D respecto a la concentración de la especie que se difunde; por ejemplo, si la concentración de los dopantes es pequeña. Así, en los datos de la tabla 5-1 y las figuras 5-18 y 5-19, de hecho, no se tiene en cuenta la dependencia entre D y la concentración de la especie que se difunde. En las mezclas gaseosas se observa, experimentalmente, que D sí depende de la concentración; sin embargo, para determinada temperatura, el valor de D tiende con rapidez a un valor relativamente constante, aunque cambie la concentración de la especie gaseosa.[7] En los sólidos, la dependencia de D respecto a la concentración puede ser muy marcada. Por ejemplo, en el sistema oro-níquel, el coeficiente de difusión del oro (Au) en el níquel (Ni) aumenta 10 veces cuando la concentración de oro en la aleación Au-Ni aumenta de 20 a 80% atómico de oro. La figura 5-24 muestra la dependencia del coeficiente de difusión del Au en distintas aleaciones.

En algunos casos, la difusión parece efectuarse “cuesta arriba”, es decir, de concentración menor a concentración mayor. Esto se parece a la ilusión óptica en la que parece que el agua

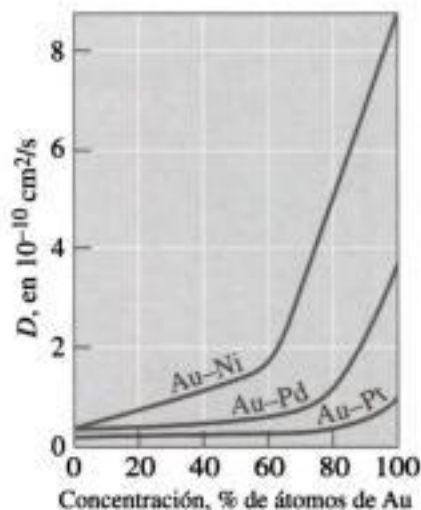


Figura 5-24

Dependencia del coeficiente de difusión de Au respecto a la concentración. (Fuente: Adaptado de *Physical Metallurgy Principles*, 3a. ed., por R.E. Reed-Hill y R. Abbaschian, p. 363, fig. 12-3. Copyright © 1991, Brooks/Cole Thomson Learning. Adaptado con autorización.)

sube por un plano inclinado ¡desafiando la gravedad! Este proceso se llama **difusión cuesta arriba**, y se puede demostrar que se apega a la ley de Fick, si se comprende que se debe tener en cuenta el *potencial químico*, es decir, la *concentración efectiva* y no la nominal, de la especie que se difunde.[8]

En ciertos materiales cerámicos, el valor de D puede depender mucho de la composición química general del material. Los cambios de difusividades en los materiales cerámicos se relacionan en realidad con la clase de defectos puntuales introducidos por adición de dopante o porque no se cumple la estequiometría. No siempre los resultados son intuitivos, como se ilustra en el siguiente ejemplo.

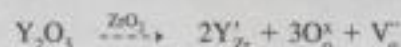
EJEMPLO 5-8

Difusión en conductores iónicos

Imaginemos dos formulaciones de zirconia estabilizada con itria (Y_2O_3 , óxido de itrio). La primera muestra contiene seis por ciento mol de itria.[9] Como cada mol de itria contiene dos moles (átomos) de itrio, la fracción molar del elemento itrio (Y) en la primera muestra sería 0.12. La segunda muestra de zirconia estabilizada con itria contiene 15 por ciento mol de itria. En consecuencia, en la segunda muestra, la fracción mol del elemento itrio (Y) es 0.30. La introducción de itria (Y_2O_3) crea vacancias de oxígeno y defectos, hacia donde se dirigen los iones de itrio, en los sitios de Zr^{4+} . Escriba la ecuación química de defectos con la notación de Kröger-Vink. Demuestre que la concentración de vacancias de ion oxígeno será aproximadamente la mitad de la concentración del óxido de itrio (Y_2O_3). Con lo anterior, indique cuál composición de itria tendrá posiblemente más difusividad de iones oxígeno. Compare esta predicción con los datos de la figura 5-25.[6,10]

SOLUCIÓN

Primero se escribirá la ecuación de la química de los defectos, para la introducción de itria en zirconia, usando la notación de Kröger-Vink (capítulo 4). Se debe asegurar que se satisfagan las condiciones de neutralidad eléctrica, balance de masas y balance de sitios. La ecuación para expresar la adición de óxido de itrio es:



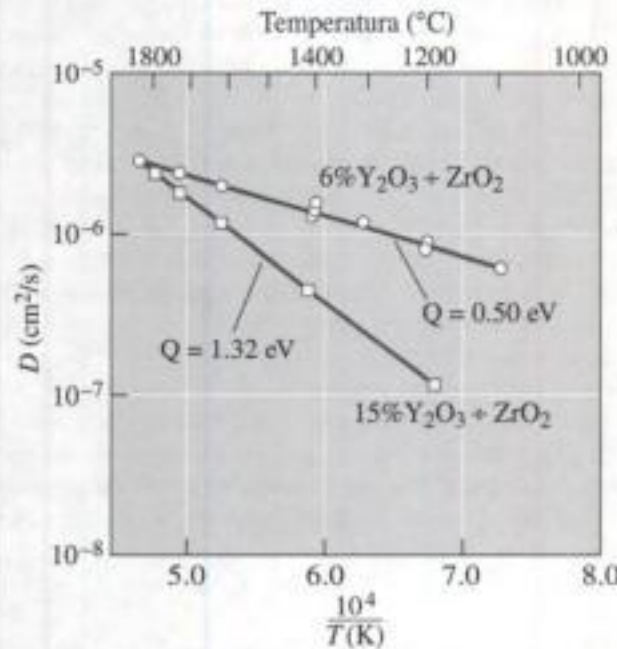


Figura 5-25 Difusividad de iones oxígeno en cerámica de zirconia estabilizada con itria (para el ejemplo 5-8). (Fuente: Adaptado de Physical Ceramics: Principles for Ceramic Science and Engineering, por Y.M. Chiang, D. Birnie y W.D. Kingery, fig. 3-14. Copyright © 1997, John Wiley & Sons, Inc. Basada en Transport in Nonstoichiometric Compounds, por G. Simkovich and U.S. Stulman (Eds.), pp. 188-202, Plenum Press. Adaptado con autorización.)

Al escribirla, se está suponiendo que el oxígeno disponible en la atmósfera no desempeña papel alguno en la determinación de la química de defectos. Dos iones itrio van a dos sitios de ion zirconio. Como usamos dos sitios de zirconio, debemos usar cuatro sitios de oxígeno en la zirconia. Tres iones oxígeno de la itria van a tres sitios de ion oxígeno en la zirconia, y queda vacío un sitio de ion oxígeno en la zirconia. Así, por cada $2Y'_{Zr}$ defectos, hay una vacancia V''_O .

Por consiguiente,

$$[Y'_{Zr}] = 2 [V''_O]$$

Recuérdese que los corchetes indican concentración de defectos.

Para la muestra con 6% de Y_2O_3 se tendrá 12% mol de iones itrio (Y^{+3}). Estos iones van a los sitios de zirconio y, en consecuencia,

$$[Y'_{Zr}] = 12 \text{ mol\%}$$

Entonces, la concentración de vacancias de ion oxígeno se determinaría con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} [Y'_{Zr}] &= 12\% = 2[V''_O] \\ \therefore [V''_O] &= 6\% \end{aligned}$$

De igual manera, para la segunda muestra con 15% de óxido de itrio, habrá 30% de iones itrio (Y^{+3}) y así la concentración de vacancias de ion oxígeno será 15%.

Cabe esperar que la difusividad de los iones oxígeno sea mayor en la formulación con 15% de itria, porque tiene más vacancias de ion oxígeno; es decir, $[V_{O''}] = 15\%$.

La figura 5-25 muestra datos experimentales de las difusividades medidas de iones oxígeno en esos dos materiales. Obsérvese que la difusión del oxígeno en la muestra con 6% mol de itria en realidad es ¡mayor que en la itria de 15% mol!

No es lo que cabría esperar, de acuerdo con nuestro conocimiento del proceso de la difusión y de nuestra intuición. Son complicadas las razones por las cuales los iones oxígeno son menos móviles en la itria de 15% mol. La menor difusividad de los iones oxígeno en muestras que contienen mayores concentraciones de vacancias se puede relacionar con la asociación o agrupamiento tanto de vacancias de iones oxígeno como de iones itrio en sitios de ion zirconio. Estos defectos parecen estar sujetando una parte considerable de vacancias de iones oxígeno y, por ello, suprimen la difusión de los iones oxígeno, así como su transporte.

Este ejemplo ilustra la forma como, en los óxidos cerámicos, cambia la química de los defectos, debido a que los aditivos y la no estequiometría pueden tener un gran impacto sobre el transporte de masa y la conductividad eléctrica de los materiales. Como se ilustra en este ejemplo, no siempre los efectos de tales cambios son intuitivamente obvios.

5-7 Permeabilidad de los polímeros

En los polímeros, es muy importante la difusión de átomos o de pequeñas moléculas entre las largas cadenas poliméricas. Como ingenieros, manejamos con frecuencia la permeabilidad de los polímeros y otros materiales, y no los coeficientes de difusión. La permeabilidad se expresa en términos del volumen de gas o vapor que puede permear por unidad de área y por unidad de tiempo o por unidad de espesor a la temperatura y humedad relativa especificada. Los polímeros que contienen un grupo polar (por ejemplo, el alcohol etileno vinílico) tienen mayor permeabilidad para el vapor de agua que para el oxígeno gaseoso. Por otro lado, el polietileno tiene una permeabilidad mucho mayor para el oxígeno que para el vapor de agua.[11] En general, cuanto más compacta sea la estructura de los polímeros, menor será su permeabilidad. Por ejemplo, el polietileno de baja densidad tiene mayor permeabilidad que el polietileno de alta densidad. Los polímeros que se usan en alimentos y otras aplicaciones deben tener las propiedades de barrera adecuadas. Por ejemplo, las películas de polímero se suelen usar para guardar alimentos. Si el aire se difunde a través de la película, puede ser que el alimento se descomponga. De igual modo, se debe tener cuidado en el almacenamiento de polvos de cerámica o metálicos que sean sensibles al vapor de agua, nitrógeno, oxígeno o dióxido de carbono atmosféricos. Por ejemplo, los polvos de óxido de zinc que se usan en cauchos, pinturas y cerámicas se deben guardar en bolsas de polietileno para evitar que reaccionen con el vapor de agua atmosférico. Si se difunde el aire a través de la cámara de un neumático de automóvil, ese neumático se desinflará.

La difusión de ciertas moléculas en un polímero puede causar problemas de hinchamiento. Por ejemplo, en aplicaciones automotrices, los polímeros que se usan para fabricar sellos en "O" pueden absorber cantidades considerables de aceite e hincharse. Por otra parte, se requiere la difusión para que los colorantes entren uniformemente en muchas de las telas hechas de polímeros. Para desalinizar el agua, se usa la difusión selectiva a través de membranas poliméricas. Las moléculas de agua pasan por la membrana del polímero, y los iones en las sales quedan atrapados. Como se dijo antes, los globos de helio de Mylar™ son de PET o de polietileno y nylon, recubierto con una película metálica. En cada uno de estos ejemplos, los átomos, iones o moléculas que se difunden penetran entre las cadenas poliméricas, más que moverse de un lugar a otro dentro de la estructura de cadenas. La difusión será más rápida a través de estas estructuras cuando la especie que se difunde sea más pequeña, o cuando entre las cadenas haya huecos más

grandes. Por ejemplo, la difusión a través de polímeros cristalinos es más lenta que a través de polímeros amorfos, que no tienen orden de largo alcance y, en consecuencia, tienen menor densidad. El siguiente ejemplo ilustra cómo se deben tener en cuenta la permeabilidad y otros factores para seleccionar polímeros para fabricar botellas para bebidas.

EJEMPLO 5-9

Diseño de botellas para bebidas carbonatadas

Se desea seleccionar un polímero para fabricar botellas de plástico que se puedan usar para guardar bebidas carbonatadas. ¿Qué factores consideraría usted para seleccionar un polímero para esta aplicación?

SOLUCIÓN

Para seleccionar un plástico para la fabricación de botellas para bebidas, se deben tener en cuenta varios factores, técnicos y no técnicos. En primer lugar, como las botellas se van a usar para guardar bebidas carbonatadas, se debe escoger un material plástico con difusividad pequeña para el dióxido de carbono gaseoso. El dióxido de carbono disuelto en la bebida está a presión y, en consecuencia, los valores de las difusividades que se deben comparar deben tenerlo en cuenta. Además, las materias primas y el procesamiento de los polímeros seleccionados deben ser, relativamente, poco costosos. De preferencia, se debe poder producir botellas con distintos colores, si es necesario, y las botellas deben conservar la transparencia óptica. Los polímeros no deben ser tóxicos ni reactivos, y deben ser reciclables. Las botellas deben tener la resistencia suficiente como para soportar una caída desde unos dos metros. Con frecuencia, esto se determina mediante la "prueba de caída". La superficie del polímero también se debe prestar a la impresión de etiquetas u otra información del producto. También se deben tener en cuenta los materiales y los costos del procesamiento. Con base en estas consideraciones importantes, se podría seleccionar tereftalato de polietileno (PET) para esta aplicación.

También debe tenerse en cuenta el efecto del procesamiento sobre la microestructura resultante de los polímeros. Por ejemplo, el PET fabricado por enfriamiento rápido desde la temperatura de procesamiento cercana a 95 °C (la temperatura de transformación vítrea es 76 °C aproximadamente) será ópticamente transparente (pero muy permeable a los gases). El proceso de soplado y estirado que se usa en la manufactura de botellas (capítulos 3 y 4) también afecta la resistencia de las botellas y su transparencia. En consecuencia, también debe optimizarse el procesamiento del PET. Como se describió en los capítulos anteriores, un proceso de soplado y estirado es adecuado para fabricar botellas.

5-8

Perfil de composición (segunda ley de Fick)

La segunda ley de Fick, que describe la difusión dinámica, o en estado no estacionario, de los átomos, es la ecuación diferencial

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (5-5)$$

Si se supone que el coeficiente de difusión D no es una función de la ubicación x ni de la concentración (c) de la especie que se difunde, se puede plantear una versión simplificada de la segunda ley de Fick, como sigue:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right) \quad (5-6)$$

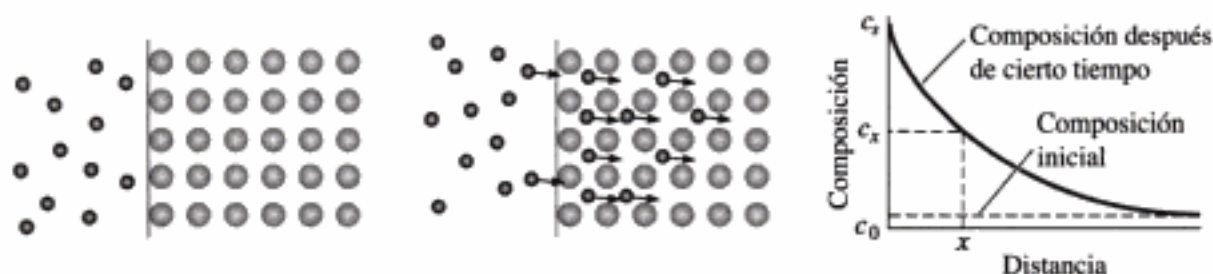


Figura 5-26 Difusión de átomos en la superficie de un material, para ilustrar la aplicación de la segunda ley de Fick.

La solución de esta ecuación depende de las “condiciones a la frontera” para un caso en particular. Una solución es

$$\frac{c_s - c_x}{c_s - c_0} = \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (5-7)$$

en donde c_s es una concentración constante de los átomos que se difunden en la superficie del material, c_0 es la concentración inicial uniforme de los átomos que se difunden en el material, y c_x es la concentración del átomo que se difunde en el lugar x abajo de la superficie, después del tiempo t . Estas concentraciones se ilustran en la figura 5-26. En ellas se ha supuesto, en forma básica, un modelo unidimensional; es decir, se supone que los átomos u otras especies que se difunden sólo se mueven en la dirección x . La función “erf” es la función de error, y se puede evaluar en la tabla 5-3 o en la figura 5-27. Obsérvese que la mayoría de las

TABLA 5-3 ■ Valores de la función de error para la segunda ley de Fick

Argumento de la función de error $\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$	Valor de la función de error $\operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$
0	0
0.10	0.1125
0.20	0.2227
0.30	0.3286
0.40	0.4284
0.50	0.5205
0.60	0.6039
0.70	0.6778
0.80	0.7421
0.90	0.7970
1.00	0.8427
1.50	0.9661
2.00	0.9953

Téngase en cuenta que los valores de la función de error se encuentran en muchos paquetes de programa en las computadoras personales.

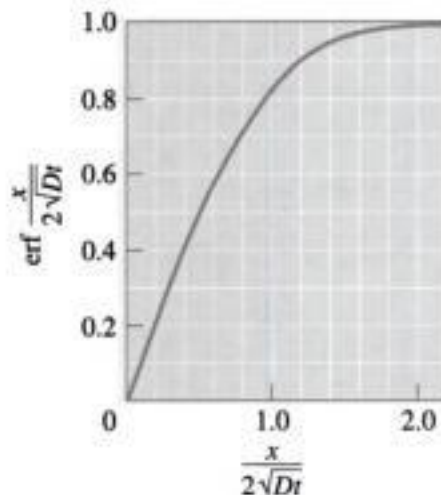


Figura 5-27

Gráfica que ilustra el argumento y el valor de la función en la segunda ley de Fick.

hojas de cálculo normales y de otros programas disponibles en una computadora personal (por ejemplo, Excel™) también proporcionan los valores de la función de error.

La definición matemática de la función de error es la siguiente:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-y^2) dy \quad (5-8)$$

En la ecuación 5-8, x es el argumento de la función de error. También se define una función de error complementario como sigue:

$$\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x) \quad (5-9)$$

Esta función se usa en ciertas formas de solución de la segunda ley de Fick.

Como se mencionó antes, según las condiciones a la frontera, se obtienen distintas soluciones; es decir, hay varias ecuaciones que describen las soluciones de la segunda ley de Fick.[6,8,12] Esas soluciones de la segunda ley de Fick permiten calcular la concentración de una especie que se difunde en función del tiempo t y de la ubicación x . La ecuación 5-7 es una solución posible de la ley de Fick que describe la variación de la concentración de distintas especies cerca de la superficie del material en función del tiempo y la distancia, siempre y cuando el coeficiente de difusión D permanezca constante y las concentraciones de los átomos que se difunden en la superficie (c_s) y a una distancia grande (x) dentro del material (c_0) permanezcan invariantes. La segunda ley de Fick también puede ayudar a diseñar diversas técnicas de procesamiento de materiales, incluyendo el tratamiento térmico de **cementación o carburización** del acero y la difusión de dopantes en semiconductores, como se describe en los siguientes ejemplos.

EJEMPLO 5-10 Diseño de un tratamiento de cementación

Se debe endurecer la superficie de engranes de acero con 0.1% de C, por cementación. En la cementación en fase gaseosa, los engranes de acero se colocan en una atmósfera que suministra 1.2% de C a la superficie del acero a alta temperatura (Fig. 5-1). A continuación, el carbono se difunde de la superficie al acero. Para obtener propiedades óptimas, el acero debe contener 0.45% de C a una profundidad de 0.2 cm bajo la superficie. Diseñe un tratamiento térmico de carburización que produzca estas propiedades óptimas. Suponga que la temperatura es suficientemente elevada (mínimo 900 °C) para que el hierro tenga la estructura FCC.

SOLUCIÓN

Ya que se suponen válidas las condiciones a la frontera con las que se dedujo la ecuación 5-7, se puede usar esa ecuación.

$$\frac{c_s - c_x}{c_s - c_0} = \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)$$

Se sabe que $c_s = 1.2\%$ de C, $c_0 = 0.1\%$ de C, $c_x = 0.45\%$ de C y $x = 0.2$ cm. De acuerdo con la segunda ley de Fick,

$$\frac{c_s - c_x}{c_s - c_0} = \frac{1.2\% \text{ de C} - 0.45\% \text{ de C}}{1.2\% \text{ de C} - 0.1\% \text{ de C}} = 0.68 = \operatorname{erf} \left(\frac{0.2 \text{ cm}}{2\sqrt{Dt}} \right) = \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \text{ cm}}{\sqrt{Dt}} \right)$$

En la tabla 5-3 se observa que

$$\frac{0.1 \text{ cm}}{\sqrt{Dt}} = 0.71 \quad \text{o sea} \quad Dt = \left(\frac{0.1}{0.71} \right)^2 = 0.0198 \text{ cm}^2$$

Toda combinación de D y t cuyo producto sea 0.0198 cm^2 será válida. Para el carbono que se difunde en hierro FCC, el coeficiente de difusión se relaciona con la temperatura con la ecuación 5-4:

$$D = D_0 \exp \left(\frac{-Q}{RT} \right)$$

Según la tabla 5-1,

$$D = 0.23 \exp \left(\frac{-32\,900 \text{ cal/mol}}{1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}} T (\text{K})} \right) = 0.23 \exp \left(\frac{-16\,558}{T} \right)$$

En consecuencia, la temperatura y el tiempo del tratamiento térmico se relacionan con la ecuación:

$$t = \frac{0.0198 \text{ cm}^2}{D \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}} = \frac{0.0198 \text{ cm}^2}{0.23 \exp(-16\,558/T) \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}} = \frac{-0.0861}{\exp(-16\,558/T)}$$

Algunas combinaciones válidas de temperaturas y tiempos son:

Si $T = 900^\circ\text{C} = 1173 \text{ K}$, entonces $t = 116\,174 \text{ s} = 32.3 \text{ h}$

Si $T = 1000^\circ\text{C} = 1273 \text{ K}$, entonces $t = 36\,360 \text{ s} = 10.7 \text{ h}$

Si $T = 1100^\circ\text{C} = 1373 \text{ K}$, entonces $t = 14\,880 \text{ s} = 4.13 \text{ h}$

Si $T = 1200^\circ\text{C} = 1473 \text{ K}$, entonces $t = 6\,560 \text{ s} = 1.82 \text{ h}$

La combinación exacta de temperatura y tiempo dependerá de la temperatura máxima a la que puede llegar el horno de tratamiento, de la velocidad a la que las partes deban de ser producidas y de la economía resultante del balance entre mayores temperaturas y mayores tiempos. Otro factor que es importante tener en cuenta son los cambios de microestructura que suceden en el resto del material. Por ejemplo, mientras se difunde el carbono a la superficie, el resto de la estructura puede sufrir crecimiento de grano u otros cambios.

El ejemplo 5-11 muestra que una de las consecuencias de la segunda ley de Fick es que se puede obtener el mismo perfil de concentración para distintas condiciones de procesamiento, siempre y cuando el término Dt sea constante. Eso permite determinar el efecto que tiene la temperatura sobre el tiempo requerido para lograr determinado tratamiento térmico.

EJEMPLO 5-11 Diseño de un tratamiento térmico más económico

Se observa que se requieren 10 h para cementar exitosamente un lote de 500 engranes de acero a 900 °C, cuando el hierro tiene la estructura FCC. Se observa que cuesta \$1000 por hora el funcionamiento del horno de cementación a 900 °C y \$1500 por hora a 1000 °C. ¿Es económico aumentar la temperatura de cementación a 1000 °C? ¿Qué otros factores se deben tener en cuenta?

SOLUCIÓN

De nuevo, se supone que se puede aplicar la solución de la segunda ley de Fick expresada por la ecuación 5-7.

$$\frac{c_x - c_s}{c_s - c_0} = \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)$$

Obsérvese que, ya que sólo se manejan cambios en tiempo y temperatura del tratamiento térmico, el término Dt debe ser constante.

Para lograr el mismo tratamiento de cementación a 1000 °C que a 900 °C:

$$D_{1273} t_{1273} = D_{1173} t_{1173}$$

Las temperaturas de interés son 900 °C = 1173 K y 1000 °C = 1273 K. Para la difusión de carbono en hierro FCC, la energía de activación es 32 900 cal/mol. Como se están manejando relaciones de tiempos, no importa si se sustituye el tiempo en horas o en segundos. Sin embargo, siempre se aconseja usar unidades que se simplifiquen entre sí. En consecuencia, el tiempo se expresará en segundos. Obsérvese que las temperaturas se deben convertir a Kelvin.

$$D_{1273} t_{1273} = D_{1173} t_{1173}$$

$$D = D_0 \exp(-Q/RT)$$

$$t_{1273} = \frac{D_{1173} t_{1173}}{D_{1273}}$$

$$= \frac{D_0 \exp \left[\frac{32\,900 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}}{1.987 \frac{\text{cal}}{\text{K} \cdot \text{mol}} 1173 \text{ K}} \right] (10 \text{ horas})(3600 \text{ seg/hora})}{D_0 \exp \left[\frac{32\,900 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}}{1.987 \frac{\text{cal}}{\text{K} \cdot \text{mol}} 1273 \text{ K}} \right]}$$

$$t_{1273} = \frac{\exp(-14.11562)(10)(3600)}{\exp(-13.00677)} = (10) \exp(-1.10885)$$

$$= (10) (0.3299) (3600) \text{ s}$$

$$t_{1273} = 3.299 \text{ h} = 3 \text{ h y } 18 \text{ min}$$

Obsérvese que en realidad no se necesitó el valor del término D_0 preexponencial, porque se eliminó en la manipulación matemática.

A 900 °C, el costo por cada parte es $(\$1000/\text{h})(10\text{ h})/500\text{ partes} = \$20/\text{parte}$

A 1000 °C, el costo por parte es $\$1500/\text{h}(3.299\text{ h})/500\text{ partes} = \$9.90/\text{parte}$

Si sólo se tiene en cuenta el costo de funcionamiento del horno, al aumentar la temperatura se reduce el costo de los engranajes y se aumenta la tasa de producción. Otro factor que se debe tener en cuenta es si el tratamiento térmico a 1000 °C puede causar algunos otros cambios microestructurales o de otra índole. Por ejemplo, ¿el incremento en la temperatura origina un crecimiento significativo de los granos? De ser así, se debilitaría el material. ¿Cómo influye el incremento en la temperatura sobre la durabilidad del equipo, es decir, del horno mismo o de los accesorios? Un enfriamiento desde una temperatura mayor ¿causará esfuerzos residuales? ¿Seguirá cumpliendo el producto con todas las demás especificaciones? Se deben tener en cuenta éstas y otras razones. La clave es que, como ingenieros, debemos asegurar que la solución propuesta no sólo sea técnicamente válida y económicamente adecuada, sino que también debe reconocer el sistema en su totalidad (es decir, una perspectiva más amplia) **y hacer que tenga sentido. Con frecuencia, una buena solución es sencilla, resuelve los problemas del sistema y no crea problemas nuevos.**

EJEMPLO 5-12

Fabricación de dispositivos de silicio

Los dispositivos como transistores (Fig. 5-2) se fabrican dopando semiconductores con diversas dopantes para generar regiones que tengan semiconductividad tipo p o tipo n.[1] El coeficiente de difusión del fósforo (P) en el Si es $D = 6.5 \times 10^{-13}\text{ cm}^2/\text{s}$ a 1100 °C de temperatura.[13] Suponga que la fuente proporciona una concentración superficial de $10^{20}\text{ átomos}/\text{cm}^3$ y que el tiempo de difusión es una hora. Suponga que para empezar, la oblea de silicio no contiene P.

- Calcule la profundidad a la cual la concentración de P será $10^{18}\text{ átomos}/\text{cm}^3$. Enuncie todas las hipótesis que haya hecho para resolver este problema.
- ¿Qué sucederá con el perfil de concentración al enfriar la oblea de Si con contenido de P?
- ¿Qué sucederá si ahora se debe recalentar la oblea para difundirle boro (B) y crear una región tipo p?

SOLUCIÓN

- Supondremos que se puede usar una de las soluciones de la segunda ley de Fick, es decir, la ecuación 5-7:

$$\frac{c_s - c_x}{c_s - c_0} = \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)$$

Se expresarán las concentraciones en átomos/ cm^3 , el tiempo en segundos y D en $\frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$. En consecuencia, mientras se usen las concentraciones de c_s , c_x y c_0 en las mismas unidades, no importa qué unidades sean.

$$\frac{c_s - c_x}{c_s - c_0} = \frac{10^{20} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3} - 10^{18} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3}}{10^{20} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3} - 0 \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3}} = 0.99$$

$$= \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{(6.5 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s}) (3600 \text{ s})}} \right)$$

$$= \operatorname{erf} \left(\frac{x}{9.67 \times 10^{-5}} \right)$$

Según los valores de la función de error en la tabla 5-3 (o de una calculadora o computadora),

Si $\operatorname{erf}(z) = 0.99$, $z = 1.82$, y en consecuencia

$$1.82 = \frac{x}{9.67 \times 10^{-5}}$$

o sea

$$x = 1.76 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

es decir

$$x = (1.76 \times 10^{-4} \text{ cm}) \left(\frac{10^4 \mu\text{m}}{\text{cm}} \right)$$

$$x = 1.76 \mu\text{m}$$

Obsérvese que se ha expresado la respuesta en micrómetros, por ser la escala de longitud adecuada para esta aplicación. Las hipótesis principales que se hicieron son i) el valor de D no cambia mientras se incorpora fósforo (P) a la oblea de silicio y ii) la difusión del P sólo es en una dimensión; es decir, no se tiene en cuenta la difusión lateral.

b) Cuando se enfría la oblea a temperatura ambiente, el perfil será esencialmente igual. Así, a temperatura ambiente se tendrá en esencia la misma distribución de P que se tenía a 1100 °C. La temperatura tiene un gran efecto sobre el proceso de difusión y, a medida que se enfría la oblea, la velocidad de difusión baja mucho y, por tanto, el perfil permanece constante.

c) No se han especificado la temperatura ni el tiempo para la difusión del boro (B). Se deben tener en cuenta. Las temperaturas características para la difusión del boro son de 900 a 1200 °C, y cabe esperar que a esas temperaturas también sea importante la difusión de P. Cuando se calienta de nuevo la oblea para difundirle boro, habrá que asegurarse de que el P no comience a difundirse en forma apreciable en partes de la oblea (redistribución de dopante). También se debe asegurar que el boro no se difunda hacia regiones que contengan P y, si lo hace, se deben tener en cuenta los efectos sobre el procesamiento y las propiedades eléctricas del dispositivo resultante.

Limitaciones de la aplicación de la solución basada en la de función de error dada en la ecuación 5-7 Obsérvese que en la ecuación que describe la segunda ley de Fick (ecuación 5-7):

- a) Se supone que D es independiente de la concentración de la especie que se difunde;
- b) la concentración superficial de la especie que se difunde (c_s) siempre es constante.

Hay casos en que esas condiciones no se cumplen y, en consecuencia, la evolución del perfil de concentración no será predicha por la solución de función de error de la ecuación 5-7. Si

las condiciones a la frontera son distintas de las que se supusieron, se deben usar soluciones diferentes de la segunda ley de Fick.

En la ecuación 5-7 se requiere que haya una composición constante c_0 en la interfaz; es el caso de procesos como el de cementación del acero (ejemplos 5-10 y 5-11), en los cuales se suministra carbono a la superficie del acero. Sin embargo, en muchos casos la concentración en la superficie cambia en forma gradual durante el proceso. En esos casos, se presenta la **interdifusión** de los átomos, como se muestra en la figura 5-10, y ya no es válida la ecuación 5-7. El término interdifusión significa difusión de una especie en una dirección (por ejemplo, el carbono que se difunde hacia el interior, desde la superficie) y la difusión de otra especie en dirección contraria (por ejemplo, átomos de Fe u otros que se difundan hacia afuera, hacia la superficie).

A veces, la interdifusión puede causar dificultades. Por ejemplo, cuando se liga aluminio al oro a temperatura elevada, los átomos de aluminio se difunden con más rapidez en los átomos de oro, que los de oro hacia el aluminio. En consecuencia, al final hay más átomos totales en el lado original del oro de la interfaz que en el lado original del aluminio. Esto provoca que la ubicación física de la interfaz original se mueva hacia el lado del aluminio del par de difusión. Toda partícula extraña que esté aprisionada originalmente en la interfaz también se mueve con la interfaz. A este movimiento de la interfaz, debido a velocidades distintas de difusión, se le llama **efecto Kirkendall**. En algunos casos, se forman huecos en la interfaz como resultado del efecto Kirkendall. En circuitos integrados diminutos se suelda alambre de oro al aluminio para tener una terminal externa del circuito. Durante el funcionamiento del circuito, se pueden formar huecos por coalescencia de vacancias que intervienen en el proceso de difusión; al crecer los huecos, la conexión entre Au y Al se debilita y al final puede fallar. Como se mancha la zona en torno a la conexión, a esta falla prematura se le llama **plaga púrpura**. Una técnica para evitar este problema consiste en exponer la unión soldada al hidrógeno. Éste se disuelve en el aluminio, llena las vacancias y evita la autodifusión de los átomos de aluminio. Esto evita que los átomos de aluminio se difundan hacia el oro y fragilice la soldadura.

En otros casos, aun cuando las condiciones a la frontera sean las mismas que las usadas para deducir la ecuación 5-7 o se puedan manejar con ecuaciones alternas, el coeficiente de difusión D puede tener dependencia respecto a la concentración.[6,12,13] También obsérvese que, como D tiene una fuerte dependencia de la temperatura, al suponer una D constante se suponen casos de procesamiento isotérmico. En realidad, las temperaturas rara vez son constantes en el procesamiento de materiales. A veces también puede suceder que haya químicas complejas de defectos que pueden desempeñar un papel principal y hacer que los perfiles de difusión sean bastante distintos de los predichos por la ecuación 5-7. Como resultado, no es sorprendente observar con frecuencia perfiles de concentración diferentes de los pronosticados por las diversas soluciones de la segunda ley de Fick. Por ejemplo, los perfiles de difusión de silicio (Si) y de algunos otros dopantes en el GaAs no se pueden describir con la función de error.[14] Las químicas complejas de defectos influyen en la difusión del dopante y hacen que D dependa de la concentración de la especie que se difunde.

5-9

Difusión y procesamiento de materiales

En la sección 5-1, describimos en forma breve las aplicaciones de la difusión al procesamiento de materiales. En capítulos posteriores, describiremos muchos ejemplos relacionados con la solidificación, transformaciones de fases, tratamientos térmicos, etcétera. En esta sección proporcionaremos más información para resaltar la importancia de la difusión en el procesamiento de los materiales diseñados. Los procesos difusionales se vuelven muy importantes cuando se usan o se procesan materiales a temperaturas elevadas.

Fusión y colado Uno de los métodos más usados para procesar metales, aleaciones, muchos plásticos y vidrios implica la fusión y el colado de los materiales para obtener una forma definida. La difusión desempeña un papel de importancia especial en la solidificación de los metales y las aleaciones. Durante el crecimiento de monocristales de semiconductores, por ejemplo, se debe asegurar que se tengan en cuenta las diferencias en la difusión de dopantes, tanto en estado fundido como sólido. Esto se aplica también a la difusión de los elementos durante el colado de aleaciones. De igual modo, la difusión desempeña un papel crítico en el procesamiento de vidrios. Por ejemplo, en los vidrios inorgánicos nos basamos en el hecho de que la difusión es lenta y de que no cristalizan con facilidad. Examinaremos más adelante este tema en el capítulo 8.

Sinterizado Aunque los métodos de fusión y colado son muy frecuentes para muchos materiales manufacturados, los puntos de fusión de muchos cerámicos y de algunos materiales metálicos son demasiado altos para procesarlos por estos métodos. Estos materiales relativamente refractarios se fabrican en formas adecuadas con un proceso que requiere la consolidación de pequeñas partículas de un polvo para formar una masa sólida (capítulo 14). El **sinterizado** es el tratamiento con alta temperatura que hace que se unan las partículas, reduciendo en forma gradual el volumen de los espacios o poros entre ellas. El sinterizado o sinterización es un paso frecuente en la fabricación de componentes de cerámica (por ejemplo, alúmina, titanato de bario, etc.), así como en la producción de partes metálicas mediante **metalurgia de polvos**, una ruta de procesamiento en la cual los polvos metálicos se prensan y sinterizan formando componentes densos y monolíticos. Se produce una variedad de materiales compuestos, como carburo de tungsteno-cobalto para herramientas de corte, superaleaciones, etc., usando esta técnica. Cuando las partículas son más finas, muchos átomos o iones están en la superficie; para ellas no se satisfacen los enlaces atómicos o iónicos. El resultado es que un conjunto de partículas finas de determinada masa tiene mayor energía que cuando forman un material cohesivo y macizo de la misma masa. En consecuencia, la fuerza impulsora del sinterizado de metales y cerámicos en estado sólido es la *reducción de la superficie total* de las partículas de polvo. Cuando un material pulverizado se compacta en una forma, las partículas de polvo están en contacto mutuo en muchos sitios, y entre ellas hay un espacio apreciable de poros. Para reducir la energía total del material, los átomos se difunden hacia los puntos de contacto y permiten que las partículas se adhieran entre sí, y al final hacen que los poros se contraigan.

La difusión reticular del grueso de las partículas hacia la región de cuello causa la densificación. La difusión en la superficie, o la difusión en fase gas o vapor, y la difusión reticular desde superficies curvas hacia la zona del cuello entre partículas no producen densificación (capítulo 14). Si el sinterizado se hace durante largo tiempo, se pueden eliminar los poros y el material se vuelve denso (Fig. 5-28). En la figura 5-29 se muestran las partículas de polvo de un material cerámico llamado tantalato de bario y magnesio ($\text{Ba}(\text{Mg}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3$, o BMT, por sus siglas en inglés). Este material cerámico se usa en la fabricación de componentes electrónicos llamados **resonadores dieléctricos** en los sistemas de comunicaciones inalámbricas. La microestructura de

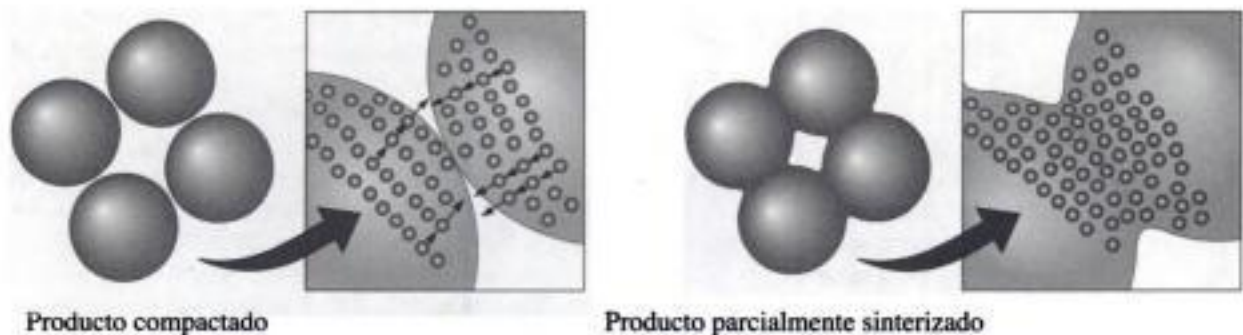


Figura 5-28 Procesos de difusión durante el sinterizado y la metalurgia de polvos. Los átomos se difunden hacia los puntos de contacto, formando puentes y reduciendo el tamaño del poro.

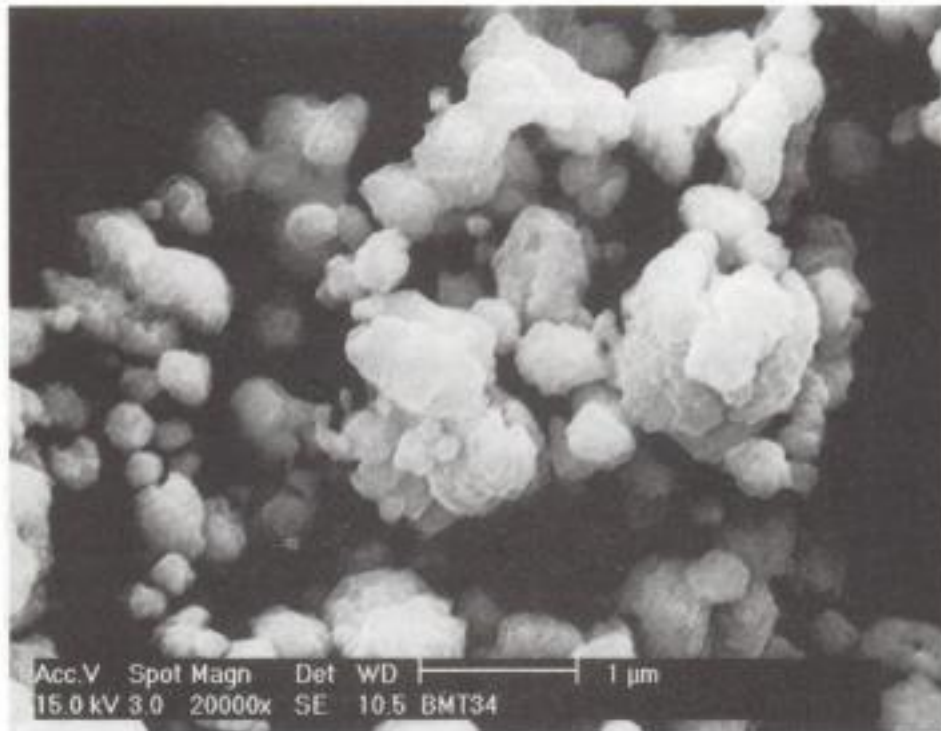


Figura 5-29 Partículas de polvo de tantalato de bario y magnesio (BMT, $\text{Ba}(\text{Mg}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3$). Este material cerámico se usa en la fabricación de componentes electrónicos llamados resonadores dieléctricos, que se utilizan en las comunicaciones inalámbricas. (Cortesía de H. Shirey.)

los cerámicos BMT se muestra en la figura 5-30. Estos cerámicos se produjeron compactando los polvos en una prensa y sinterizando el “comprimido” a una alta temperatura ($\sim 1500^\circ\text{C}$).

El grado y la velocidad de sinterización depende de a) la densidad inicial de los “comprimidos”, b) la temperatura, c) el tiempo, d) el mecanismo de sinterización, e) el tamaño promedio de partícula y f) la distribución de tamaños de las partículas de polvo. En algunos casos, se forma una fase líquida en regiones localizadas del material durante el proceso de sinterizado. Como la difusión de las especies, sean átomos o iones, es más rápida en los líquidos que en el estado sólido, la presencia de una fase líquida puede proporcionar una forma cómoda de acelerar la sinterización de muchos metales refractarios y formulaciones de cerámicos. El proceso en el que una pequeña cantidad de líquido ayuda a la densificación se llama **sinterizado en fase líquida**. Para que la fase líquida sea efectiva en ampliar el sinterizado, es importante que el líquido pueda “humectar” los granos, en forma parecida a como el agua humecta una superficie de vidrio. Si el líquido no humecta, como en el caso del mercurio que no humecta al vidrio, la fase líquida no ayudará a aumentar el sinterizado. En algunos casos, se agregan compuestos a los materiales para que causen la formación de fase líquida a las temperaturas de sinterizado. En algunos otros casos, las impurezas pueden reaccionar con el material y causar la formación de una fase líquida. En la mayoría de las aplicaciones se desea que la fase líquida sea transitoria, o que se convierta en un material cristalino durante el enfriamiento. Es la causa de que una fase vítrea, frágil y amorfa no permanezca en los límites de grano.

Cuando se necesitan densidades excepcionalmente altas, se aplica presión (sea axial o isostática) mientras se sinteriza el material. Estas técnicas se llaman **prensado en caliente**, cuando la presión es unidireccional, o **prensado isostático en caliente** (HIP, por sus siglas en inglés), cuando la presión es isostática, es decir, que se aplica en todas direcciones. Con esas técnicas se producen muchas superaleaciones y cerámicos, como el titanato de plomo, zirconio

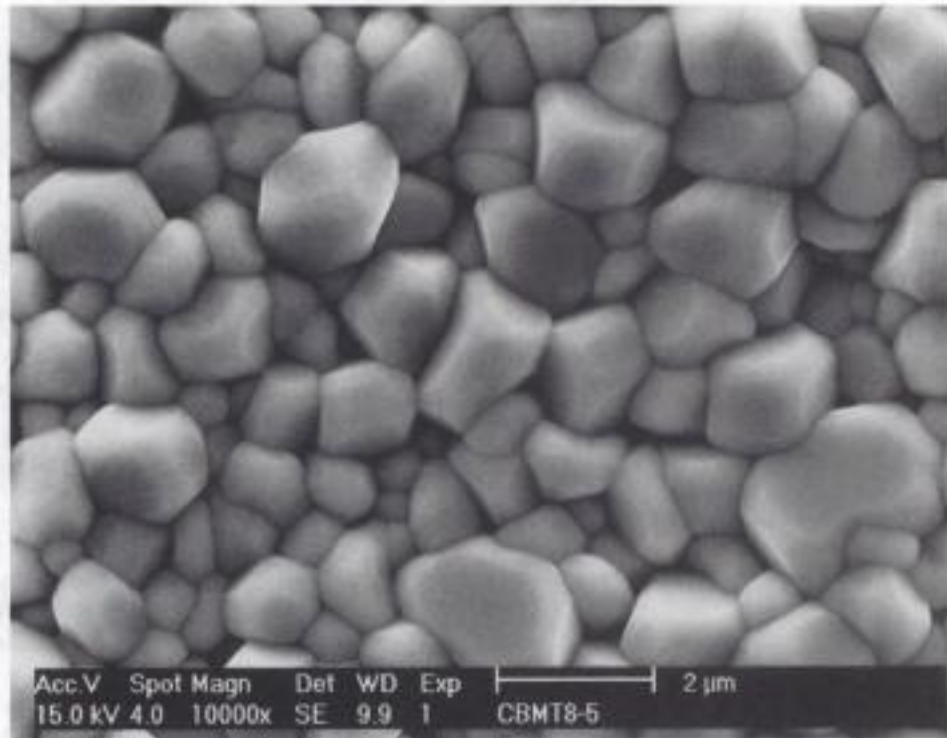
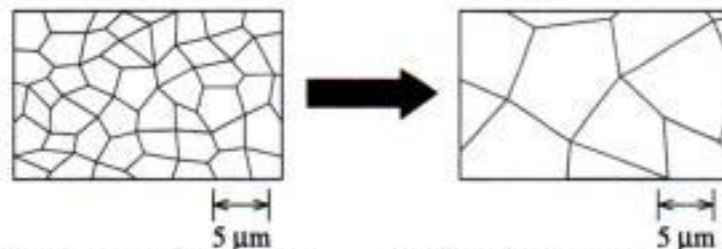


Figura 5-30 Microestructura de cerámico BMT obtenida por compactación y sinterizado de polvos de BMT. (Cortesía de H. Shirey.)

y lantano (PLZT, por sus siglas en inglés). El prensado isostático en caliente produce materiales de alta densidad con propiedades isotrópicas (capítulo 14).

Crecimiento de grano Un material policristalino contiene una gran cantidad de límites de grano que representan una zona de alta energía, por el empaquetamiento ineficiente de los átomos. Si se reduce la superficie de los límites de grano debido a su crecimiento, se obtiene una energía general menor en el material. El **crecimiento de grano** implica el movimiento de los límites de grano, lo que permite crecer los granos de mayor tamaño a expensas de los más pequeños (Fig. 5-31). Si el lector ha observado la espuma, es posible que haya visto el principio del crecimiento de grano. Se parece a la forma en que las burbujas pequeñas en la espuma desaparecen a expensas de las mayores. ¡Otra analogía es la de los peces grandes que crecen al comer peces pequeños! Para que haya crecimiento de grano en los materiales, se requiere la difusión de átomos a través del límite de grano y, en consecuencia, el crecimiento de



(a) Microestructura inicial

(b) Microestructura después del crecimiento de grano

Figura 5-31 El crecimiento de grano se efectúa cuando los átomos se difunden de un grano a otro, a través del límite de grano.

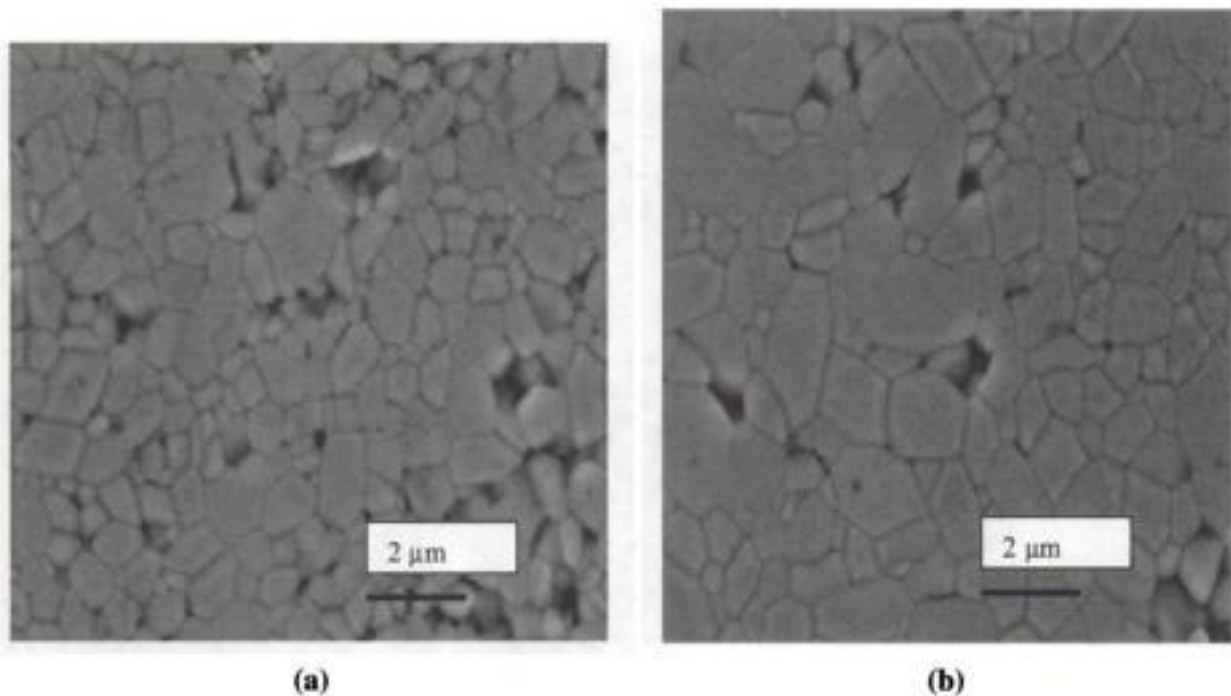


Figura 5-32 Crecimiento de grano en cerámico de alúmina; se puede ver en las micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido. (a) La micrografía de la izquierda muestra la microestructura de un cerámico de alúmina sinterizada a 1350 °C durante 15 horas. (b) La micrografía de la derecha muestra una muestra sinterizada a 1350 °C durante 300 horas. (Cortesía de I. Nettleship y R. McAfee.)

los granos se relaciona con la energía de activación necesaria para que un átomo salte a través del límite. El aumento en el tamaño de grano se puede apreciar en la secuencia de micrografías de cerámicos de alúmina de la figura 5-32.[15] Otro ejemplo en el que el crecimiento de grano desempeña una función es el filamento de tungsteno en un foco (bombilla). Al calentarse cada vez más el filamento de tungsteno, los granos crecen y lo debilitan. Este crecimiento de grano, la evaporación del tungsteno y la oxidación por el oxígeno residual contribuyen a la falla de los filamentos de tungsteno de los focos.

La **fuerza impulsora** del crecimiento de grano es la reducción del área de límites de grano. Los límites de grano son defectos, y su presencia causa un aumento de la energía libre del material. De este modo, la tendencia termodinámica de los materiales policristalinos es a transformarse en materiales que tienen mayor tamaño promedio de grano. Las temperaturas elevadas o energías de activación bajas aumentan el tamaño de los granos. Muchos tratamientos térmicos de los metales, que incluyen sostener al metal a temperaturas altas, se deben controlar con cuidado para *evitar* crecimiento de grano excesivo. Esto se debe a que, a medida que crece el tamaño de grano, la superficie de los límites de grano disminuye y ahora hay menos resistencia al movimiento de las dislocaciones. El resultado es que la resistencia de un material metálico disminuye al aumentar el tamaño de grano. Este concepto lo hemos visto antes, en forma de la ecuación de Hall-Petch (capítulo 4). En el **crecimiento normal de grano**, el tamaño de grano promedio aumenta en forma continua y el ancho de la distribución de tamaños de grano no se afecta en forma severa. En el **crecimiento anormal de grano**, la distribución de tamaños de grano tiende a ser bimodal, es decir, se obtienen pocos granos muy grandes y entonces quedan pocos granos relativamente pequeños. Ciertas propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas de los materiales dependen también de su tamaño de grano. En consecuencia, en el procesamiento de esos materiales se debe poner atención a factores que afectan las velocidades de difusión y el crecimiento del grano.

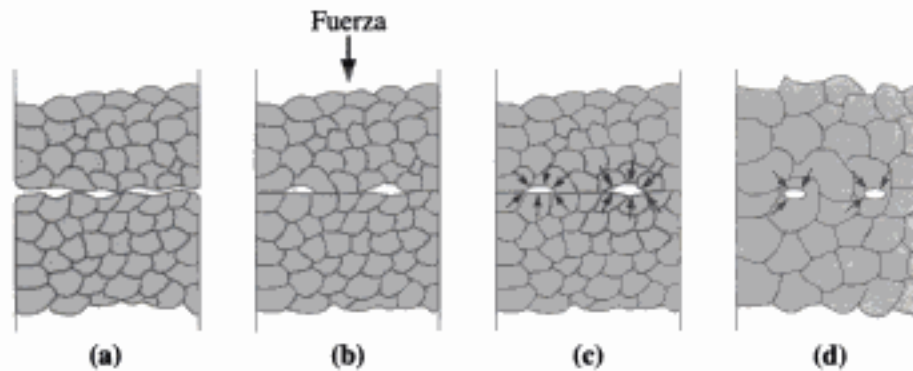


Figura 5-33 Pasos en la unión por difusión: (a) al principio, el área de contacto es pequeña; (b) al aplicar presión se deforma la superficie, aumentando el área de contacto; (c) la difusión en límites de grano permite contraer los huecos, y (d) para la eliminación final de los huecos se requiere difusión en volumen.

Unión (o soldadura) por difusión Es un proceso para unir materiales, que se lleva a cabo en tres pasos (Fig. 5-33). El primero hace que las dos superficies se unan a una alta temperatura y presión, aplanando esas superficies, fragmentando las impurezas y produciendo un área grande de contacto de átomo con átomo. Cuando las superficies permanecen comprimidas entre sí a temperaturas altas, los átomos se difunden a través de los límites de grano, hacia los huecos que quedan; los átomos condensan y reducen el tamaño de todos los huecos de la interfaz. Como la difusión en límites de grano es rápida, este segundo paso puede suceder con mucha rapidez. Sin embargo, al final el crecimiento de grano aísla los huecos restantes de los límites de grano. Para el tercer paso, la eliminación final de los huecos, debe haber difusión en volumen, que es comparativamente lenta. El proceso de unión por difusión se usa con frecuencia para unir o soldar metales reactivos como titanio, o metales y materiales disímiles, y para unir cerámicos.

RESUMEN

- El flujo neto de átomos, iones, etc., producido por la difusión depende del gradiente inicial de concentración.
- La cinética de la difusión depende sensiblemente de la temperatura. En general, la difusión es un proceso térmicamente activado, y la dependencia entre coeficiente de difusión y temperatura se obtiene con la ecuación de Arrhenius.
- El grado de difusión depende de la temperatura, el tiempo, la naturaleza y la concentración de la especie que se difunde, así como de la estructura cristalina y la composición de la matriz, de la estequiometría y de los defectos puntuales.
- La activación o limitación del proceso de difusión son la base de muchas tecnologías importantes. Algunos ejemplos son: el procesamiento de semiconductores, los tratamientos térmicos de los materiales metálicos, el sinterizado de los cerámicos y de metales en polvo, la formación de materiales amorfos, la solidificación de materiales fundidos durante un proceso de colado, la adherencia por difusión, los plásticos, películas y recubrimientos que actúan como barrera.
- También las fuerzas magnéticas, eléctricas, de convección o electroquímicas pueden causar el movimiento de partículas de otras especies, como por ejemplo, los electrones o los huecos. A esos movimientos se les llama arrastre o deriva. La tecnología de baterías, la

electroforesis, la electrodeposición y el funcionamiento de dispositivos semiconductores (como transistores) emplean el arrastre de especies diferentes.

- Las leyes de Fick describen en forma cuantitativa al proceso de difusión. La primera ley de Fick define la relación entre el gradiente del potencial químico y el flujo de las especies que se difunden. La segunda ley de Fick describe la variación de la especie que se difunde bajo condiciones de difusión en estado no estacionario.
- Para determinado sistema, la cantidad de difusión se relaciona con el término Dt . Este término permite determinar el efecto de un cambio de temperatura sobre el tiempo requerido para un proceso controlado por difusión.
- Los dos mecanismos importantes del movimiento atómico en los materiales cristalinos son la difusión de vacancias y la difusión intersticial. Los átomos sustitucionales en los materiales cristalinos se mueven por el mecanismo de vacancias.
- La velocidad de difusión está determinada por la relación de Arrhenius; esto es, la velocidad aumenta en forma exponencial con la temperatura. La difusión tiene especial importancia a temperaturas mayores que 0.4 veces la temperatura de fusión (en kelvins) del material.
- La energía de activación Q describe la facilidad con que se difunden los átomos; la difusión rápida sucede cuando la energía de activación es baja. Una energía de activación baja y una velocidad de difusión alta se obtienen en 1) la difusión intersticial, en comparación con difusión de vacancias; 2) estructuras cristalinas con menor factor de empaquetamiento; 3) materiales con baja temperatura de fusión o enlace atómico débil; y 4) difusión a lo largo de límites o superficies de grano.
- El movimiento total, o flujo, de los átomos, aumenta cuando se incrementa el gradiente de concentración y la temperatura.
- La difusión de iones en los cerámicos suele ser más lenta que la de átomos en materiales metálicos. La difusión en los cerámicos también es afectada significativamente por la falta de estequiometría, los dopantes y la posible presencia de fases líquidas durante el sinterizado.
- Se puede medir la difusión en polímeros midiendo su permeabilidad. Los polímeros se usan como capas de barrera en muchas aplicaciones, como por ejemplo, en la industria alimenticia, las fibras ópticas y los componentes microelectrónicos.
- La difusión de átomos es de primordial importancia, porque muchas de las técnicas de procesamiento de materiales requieren difusión, como sinterizado, metalurgia de polvos y adherencia por difusión. Además, muchos de los tratamientos térmicos y de los mecanismos de refuerzo para controlar las estructuras y las propiedades en los materiales son procesos de difusión controlada. La estabilidad de la estructura y las propiedades de los materiales al usarlos a altas temperaturas dependen de la difusión.

GLOSARIO

Arrastre o deriva Movimiento de electrones, huecos, iones o partículas, como resultado del gradiente de temperatura, o del campo eléctrico o magnético.

Autodifusión Movimiento aleatorio de átomos dentro de un material esencialmente puro. No se produce un cambio neto de composición.

Cementación o carburación Tratamiento térmico para endurecer la superficie de aceros mediante una fuente gaseosa o sólida de carbono. El carbono que se difunde hacia la superficie la hace más dura y más resistente a la abrasión.

Cerámicos conductores Materiales cerámicos buenos conductores de electricidad, gracias a sus portadores de carga iónicos y electrónicos (electrones, huecos o iones). Como ejemplos de esos materiales están la zirconia estabilizada, el óxido de estaño e indio, etcétera.

Coefficiente de difusión (D) Coeficiente que depende de la temperatura; se relaciona con la rapidez con que se difunden átomos, iones u otras especies. El coeficiente de difusión depende de la temperatura, la composición y la microestructura del material anfitrión y también de la concentración de la especie que se difunde.

Crecimiento anormal de grano Clase de crecimiento de grano que se observa en metales y cerámicos. En este modo de crecimiento, suele producirse una distribución de grano bimodal, ya que algunos granos se vuelven muy grandes a expensas de los granos pequeños. Véase *Crecimiento de grano* y *Crecimiento normal de grano*.

Crecimiento de grano Movimiento de límites de grano por difusión para reducir la cantidad de área de límite de grano. El resultado es que los granos pequeños se encogen y desaparecen, y otros granos se agrandan, de forma parecida a como las burbujas en la espuma de jabón se agrandan a expensas de las más pequeñas. En muchos casos, no se desea que haya crecimiento de grano.

Crecimiento normal de grano Crecimiento de grano que se hace para tratar de reducir la superficie de límites de grano. Esta clase de crecimiento de grano se debe distinguir del crecimiento anormal de grano, porque la distribución de tamaños de grano permanece unimodal, pero el tamaño promedio de grano aumenta en forma continua.

Difusión Flujo neto de átomos, iones u otras especies dentro de un material, causado por gradiente de temperatura y de concentración.

Difusión cuesta arriba Proceso de difusión en el que las especies se mueven de regiones de menor concentración a regiones de mayor concentración. El proceso sigue siendo consistente con la ley de Fick (las especies se difunden desde donde hay mayor potencial químico hacia donde hay menor potencial químico). Sin embargo, la difusión es "cuesta arriba" si se comparan concentraciones nominales y no potenciales químicos. Es decir, en este caso la difusión es tal que las especies se difunden de menor concentración hacia mayor concentración.

Difusión de vacancias Difusión de átomos cuando uno sale de una posición normal de red para llenar una vacancia en el cristal. Este proceso forma una nueva vacancia y el proceso se repite.

Difusión en límite de grano Difusión de átomos a lo largo de límites de grano. Es más rápida que la difusión en volumen, porque los átomos en los límites de grano se encuentran empaquetados menos compactamente.

Difusión superficial Difusión de átomos a lo largo de superficies, tales como de grietas o de partículas.

Difusión volumétrica Difusión de los átomos hacia el interior de los granos.

Difusión intersticial Difusión de átomos pequeños de una posición intersticial a otra en la estructura cristalina.

Difusividad Sinónimo de coeficiente de difusión (D).

Distancia de difusión Distancia máxima o deseada a la que se deben difundir los átomos; con frecuencia, es la distancia entre los lugares entre las concentraciones máxima y mínima del átomo que se difunde.

Dopado Proceso para introducir átomos de dopante (por ejemplo P, B) en semiconductores como el silicio. Como precursores de átomos de dopante que se difunden, se pueden usar fuentes sólidas, líquidas o gaseosas. Otra técnica para introducir dopantes en semiconductores es la implantación de iones.

Dopante Elemento o compuesto que se agrega en forma deliberada, por lo general, en concentraciones conocidas y en lugares conocidos, para tener un efecto positivo sobre las propiedades de un

material. Como ejemplos, están el fósforo (P) o boro (B) en el silicio (Si), o el CaO o Y_2O_3 en la zirconia (ZrO_2).

Efecto de Kirkendall Movimiento físico de una interfaz debido a velocidades distintas de difusión de los átomos dentro del material.

Electrodeposición También referido como galvanoplastia, es un proceso para reducir iones metálicos en solución y producir recubrimientos metálicos en sustratos.

Electroforesis Movimiento de pequeñas partículas (o de moléculas relativamente grandes) bajo un campo eléctrico. Las partículas portan una carga eléctrica neta.

Energía de activación Energía requerida para hacer que suceda determinada reacción. En la difusión, la energía de activación se relaciona con la energía necesaria para mover un átomo desde un sitio de red hasta otro.

Flujo Cantidad de átomos u otras especies que se difunden y pasan a través de un plano de área unitaria por unidad de tiempo. Se relaciona con la velocidad con que se transporta masa por difusión en un sólido.

Fuerza impulsora Causa que induce a un efecto. Por ejemplo, mayor gradiente de potencial químico aumenta la difusión; de igual forma, la reducción en la superficie de las partículas de polvo es la fuerza impulsora de la sinterización.

Galvanizado por inmersión en caliente Proceso en que se aplica un recubrimiento de zinc, sumergiendo las partes en un baño de zinc fundido. El proceso se usa principalmente para estructuras de acero, chasis de automóviles y otros componentes, para protegerlos contra la corrosión.

Gradiente de concentración Razón de cambio de la composición respecto a la distancia, en un material no uniforme; se suele expresar en $\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}}$ o en $\frac{\text{de \% de átomos}}{\text{cm}}$.

Hueco Partícula imaginaria en un semiconductor, que representa un electrón que falta. El hueco tiene una carga positiva de $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

Implantación de iones Técnica que usa haces de iones de alta energía para introducir átomos dopantes en semiconductores.

Interdifusión Difusión de distintos átomos en direcciones contrarias. La interdifusión puede llegar a producir una concentración de equilibrio de átomos dentro del material.

Metalurgia de polvos Método para producir partes metálicas monolíticas; se compactan polvos metálicos en la forma deseada, la cual se calienta a continuación para permitir que la difusión y el sinterizado unan los polvos y se forme una masa sólida.

Nitruración Proceso en el cual se difunde nitrógeno en la superficie de un material, como acero, lo que produce mayor dureza y resistencia al desgaste.

Par de difusión Combinación de elementos que intervienen en los estudios de difusión; por ejemplo, si se considera la difusión de Al en Si, entonces Al-Si es un par de difusión.

Permeabilidad Medida relativa de la velocidad de difusión en los materiales que, con frecuencia, se aplica a los plásticos y los recubrimientos. Frecuentemente se usa como parámetro de diseño en ingeniería para describir la eficacia de determinado material como barrera contra la difusión.

Plaga púrpura Formación de huecos en soldaduras oro-aluminio, debida a velocidades distintas de difusión de las dos clases de átomos; al final puede presentarse la falla de la soldadura.

Precursor Sustancia que se usa en procesos de deposición de película delgada, u otros, para introducir átomos en un material.

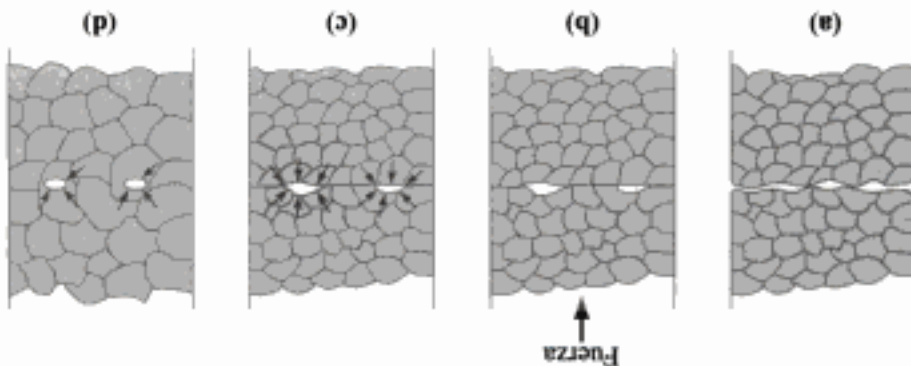
Prensado en caliente Proceso de sinterización efectuado bajo presión uniaxial, para alcanzar densidades mayores.

- electroforresis, la electrodeposición y el funcionamiento de dispositivos semiconductoros (como transistores) emplean el arrastre de especies diferentes.
- Las leyes de Fick describen en forma cuantitativa al proceso de difusión. La primera ley de Fick define la relación entre el gradiente del potencial químico y el flujo de las especies que se difunden. La segunda ley de Fick describe la variación de la especie que se difunde bajo condiciones de difusión en estado no estacionario.
 - Para determinado sistema, la cantidad de difusión se relaciona con el término Dt . Este término permite determinar el efecto de un cambio de temperatura sobre el tiempo requerido para un proceso controlado por difusión.
 - Los dos mecanismos importantes del movimiento atómico en los materiales cristalinos son la difusión de vacancias y la difusión intersticial. Los átomos sustitucionales en los materiales cristalinos se mueven por el mecanismo de vacancias.
 - La velocidad de difusión está determinada por la relación de Arrhenius; esto es, la velocidad aumenta en forma exponencial con la temperatura. La difusión tiene especial importancia a temperaturas mayores que 0.4 veces la temperatura de fusión (en kelvins) del material.
 - La energía de activación Q describe la facilidad con que se difunden los átomos; la difusión rápida sucede cuando la energía de activación es baja. Una energía de activación baja y una velocidad de difusión alta se obtienen en 1) la difusión intersticial, en comparación con difusión de vacancias; 2) estructuras cristalinas con menor factor de empaquetamiento; 3) materiales con baja temperatura de fusión o enlace atómico débil; y 4) difusión a lo largo de límites o superficies de grano.
 - El movimiento total, o flujo, de los átomos, aumenta cuando se incrementa el gradiente de concentración y la temperatura.
 - La difusión de iones en los cerámicos suele ser más lenta que la de átomos en materiales metálicos. La difusión en los cerámicos también es afectada significativamente por la falta de estequiometría, los dopantes y la posible presencia de fases líquidas durante el sinterizado.
 - Se puede medir la difusión en polímeros midiendo su permeabilidad. Los polímeros se usan como capas de barrera en muchas aplicaciones, como por ejemplo, en la industria alimenticia, las fibras ópticas y los componentes microelectrónicos.
 - La difusión de átomos es de primordial importancia, porque muchas de las técnicas de procesamiento de materiales requieren difusión, como sinterizado, metalurgia de polvos y adherencia por difusión. Además, muchos de los tratamientos térmicos y de los mecanismos de refuerzo para controlar las estructuras y las propiedades en los materiales son procesos de difusión controlada. La estabilidad de la estructura y las propiedades de los materiales al usarlos a altas temperaturas dependen de la difusión.
- Arrastre o deriva Movimiento de electrones, huecos, iones o partículas, como resultado del gradiente de temperatura, o del campo eléctrico o magnético.
- Autodifusión Movimiento aleatorio de átomos dentro de un material esencialmente puro. No se produce un cambio neto de composición.
- Cementación o carburación Tratamiento térmico para endurecer la superficie de aceros mediante una fuente gaseosa o sólida de carbono. El carbono que se difunde hacia la superficie la hace más dura y más resistente a la abrasión.

- El flujo neto de átomos, iones, etc., producido por la difusión depende del gradiente inicial de concentración.
- La cinética de la difusión depende sensiblemente de la temperatura. En general, la difusión es un proceso térmicamente activado, y la dependencia entre coeficiente de difusión y temperatura se obtiene con la ecuación de Arrhenius.
- El grado de difusión depende de la temperatura, el tiempo, la naturaleza y la concentración de la especie que se difunde, así como de la estructura cristalina y la composición de la matriz, de la estequiometría y de los defectos puntuales.
- La activación o limitación del proceso de difusión son la base de muchas tecnologías importantes. Algunos ejemplos son: el procesamiento de semiconductores, los tratamientos térmicos de los materiales metálicos, el sinterizado de los cerámicos y de metales en polvo, la formación de materiales amorfos, la solidificación de materiales fundidos durante un proceso de colado, la adherencia por difusión, los plásticos, películas y recubrimientos que actúan como barrera.
- También las fuerzas magnéticas, eléctricas, de convección o electroquímicas pueden causar el movimiento de partículas de otras especies, como por ejemplo, los electrones o los huecos. A esos movimientos se les llama arrastre o deriva. La tecnología de baterías, la

Unión (o soldadura) por difusión. Es un proceso para unir materiales, que se lleva a cabo en tres pasos (Fig. 5-33). El primero hace que las dos superficies se unan a una temperatura y presión, aplastando esas superficies, fragmentando las impurezas y produciendo un área grande de contacto de átomo con átomo. Cuando las superficies permanecen comprimidas entre sí a temperaturas altas, los átomos se difunden a través de los límites de grano, hacia los huecos que quedan; los átomos condensan y reducen el tamaño de todos los huecos de la interfaz. Como la difusión en límites de grano es rápida, este segundo paso puede suceder con mucha rapidez. Sin embargo, al final el crecimiento de grano aísla los huecos restantes de los límites de grano. Para el tercer paso, la eliminación final de los huecos, debe haber difusión en volumen, que es comparativamente lenta. El proceso de unión por difusión se usa con frecuencia para unir o soldar metales reactivos como titanio, o metales y materiales disímiles, y para unir cerámicos.

Figura 5-33 Pasos en la unión por difusión: (a) al principio, el área de contacto es pequeña; (b) al aplicar presión se deforma la superficie, aumentando el área de contacto; (c) la difusión en límites de grano permite contraer los huecos, y (d) para la eliminación final de los huecos se requiere difusión en volumen.



8. WILKINSON, D.S. *Mass Transport in Solids and Fluids*, Cambridge University Press, 2000.
9. EROD, N.G. *Se agradecen las discusiones técnicas*, 2002.
10. OISHI, Y. y K. ANDO. *En Transport in Nonstoichiometric Compounds*, G. SHIROKOVICH y U.S. STRUBB-CAN, Eds., Plenum, pp. 188-202.
11. ROSATO, D., D. DIXMARTIA y D. ROSATO. *Designing with Plastics and Composites*, Nueva York, Van Nostrand, Reinhold, 1991.
12. CRANK, J. *The Mathematics of Diffusion*, 2a. ed., Oxford, Clarendon Press, 1980.
13. MIDJEMAN, S. y A.K. HOCHBERG. *Process Engineering Analysis in Semiconductor Device Fabrication*, McGraw Hill, 1993.
14. YAN, T.Y. "Diffusion in Gallium Arsenide and Aluminum Arsenide-Gallium Arsenide Materials", *en Encyclopedia of Advanced Materials*, R.J.B.D. BLOOR, M.C. FLEMINGS y S. MAHAJAN, Eds., Pergamon Press, 1994, pp. 635-641.
15. McABEE, R. e I. NETTLESHIP. *Se agradecen las discusiones técnicas*, 2002.
16. DAVEN, L. *Trans. AIME*, 180, 1949, p. 430.
17. KASO, K. *Semiconductor Devices*, Prentice Hall, 1998, pp. 168-170.

PROBLEMAS

- Sección 5-1 Aplicaciones de la difusión**
- 5-1 ¿Cuál es la fuerza impulsora de la difusión?
- 5-2 En el tratamiento de cementación para aceros ¿cuáles son las especies que se difunden?
- 5-3 ¿Por qué se usa plástico PET para fabricar botellas para bebidas carbonatadas?
- 5-4 ¿Qué es galvanizado por inmersión en caliente? ¿Cuáles son las aplicaciones de este proceso?
- 5-5 ¿Por qué el aluminio que se oxida con mayor facilidad que el hierro, se considera normalmente que no se "oxida"?
- 5-6 ¿Qué es electroforesis? ¿Cuál es la fuerza impulsora de este fenómeno? ¿Cuáles son sus aplicaciones?
- 5-7 ¿Qué es un recubrimiento de barrera térmica? ¿Dónde se usan esos recubrimientos?
- 5-8 ¿Cuál es la diferencia entre difusión y el arrastre de portadores de carga en un semiconductor? ¿Cuál es la fuerza impulsora de cada fenómeno?
- 5-9 Trace un esquema que muestre en qué dirección se difunden y arrastran los electrones y los huecos cuando se unen los semiconductores tipo p y tipo n.
- Sección 5-2 Estabilidad de átomos e iones**
- 5-10 ¿Por qué ganó Svante Arrhenius el Premio Nobel?
- 5-11 Escriba la ecuación de Arrhenius y explique sus dimensiones.
- Sección 5-3 Mecanismos de la difusión**
- 5-12 Se observa que los átomos se mueven desde una posición en la red a otra, con una frecuencia de 5×10^7 veces a 400°C cuando la energía de activación para su movimiento es 30 000 cal/mol. Calcule la frecuencia de saltos a 750°C .
- 5-13 La cantidad de vacancias en un material se relaciona con la temperatura a través de una ecuación de Arrhenius. Si la fracción de puntos de red que contienen vacancias es 8×10^{-3} a 600°C , determine esa fracción de puntos de red a 1000°C .
- 5-14 La ecuación de Arrhenius se usó en forma original para comparar velocidades de reacciones químicas. Compare las velocidades de una reacción química a 20°C y a 100°C , calculando la relación de esas velocidades. Suponga que la energía de activación para los líquidos con que se hace la reacción química es 10 kJ/mol, y que la reacción es limitada por difusión.
- 5-15 ¿Cuáles son los distintos mecanismos de la difusión? ¿Por qué la energía de activación para la difusión a través del mecanismo intersticial es menor que para otros mecanismos?
- 5-17 ¿Cómo se verifica en forma experimental la autodifusión de átomos en metales?
- 5-18 Examine la figura 5-19. Con base en ella, se puede decir que la difusión de B, F, As y Sb siempre es mayor

Prensado isostático en caliente Proceso de sinterización en el que se aplica una presión isostática durante el sinterizado. Este proceso se usa para obtener densidades muy altas y propiedades isotópicas. Primera ley de Fick Ecuación que relaciona el flujo de átomos por difusión, con el coeficiente de difusión y el gradiente de concentración.

Pulverización catódica También llamada "evaporación catódica", es un proceso de deposición para hacer películas delgadas. Se bombardean con iones los blancos de los elementos o compuestos que forman una película. Los iones desprendidos por bombardeo iónico de esos blancos se depositan sobre un sustrato.

Recocido Tratamiento térmico en el que un material se mantiene a una temperatura relativamente alta durante largo tiempo y después se enfría con mucha lentitud. Se usa para procesar metales, cerámicos y vidrios. El objeto varía con la aplicación.

Recubrimientos de barrera térmica Recubrimientos para proteger a un componente contra el calor. Por ejemplo, algunas alabes de turbina en un motor de avión se fabrican con superaleaciones a base de níquel y se recubren con zirconia estabilizada con itria (YSZ).

Resonadores dieléctricos Piezas semejantes a "pucks" (discos) de hockey de cerámicos como tantalato de bario y magnesio (BMT) o tantalato de zinc y bario (BZN). Se usan en sistemas de comunicaciones inalámbricas, como filtros de bajas pérdidas.

Segunda ley de Fick Ecuación diferencial parcial que describe la velocidad con que se redistribuyen, por difusión, los átomos en un material. Existen muchas soluciones para la segunda ley de Fick; la ecuación 5-7 es una solución posible.

Sinterizado Tratamiento de alta temperatura para unir pequeñas partículas. La difusión de los átomos hacia los puntos de contacto forma puentes entre las partículas. La difusión continuada termina por llenar todos los huecos que quedan. La fuerza impulsora del sinterizado es una reducción en la superficie total de las partículas de polvo.

Sinterizado en fase líquida Proceso de sinterizado en el que se forma una fase líquida. Como la difusión es más rápida en los líquidos, si el líquido puede humectar los granos, puede acelerar el proceso de sinterización.

Unión p-n Región de un material semiconductor, un lado del cual está dopado con dopantes tipo p, por ejemplo B en Si, y el otro lado está dopado con dopantes tipo n, por ejemplo P en Si. La unión p-n forma el bloque fundamental de dispositivos microelectrónicos tales como los transistores.

Unión por difusión También referida como soldadura por difusión, es una técnica de unión en la que dos superficies se presan entre sí a alta presión y temperatura. La difusión de los átomos por la interfaz llena los huecos y produce un enlace resistente entre las superficies.

que la autodifusión de Si. ¿Qué indica eso acerca de los mecanismos posibles de difusión de estos elementos?

- 5-19 De acuerdo con la figura 5-19 ¿cuál es el mecanismo más probable de la difusión para Ni, Cu y H en silicio?

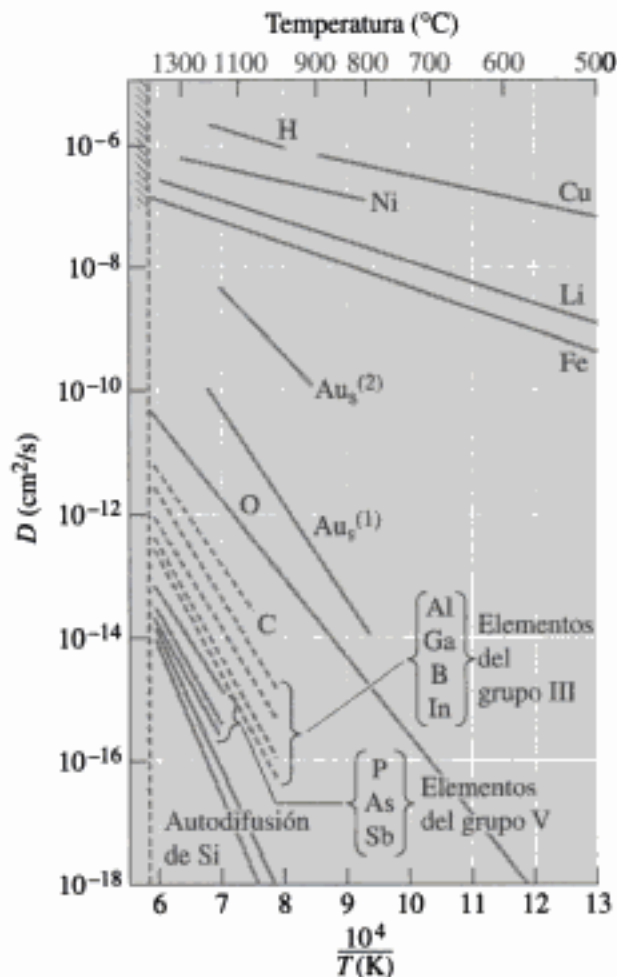


Figura 5-19. (Repetida para los problemas 5-18, 5-19, 5-21, 5-22 y 5-23). Coeficientes de difusión para distintos dopantes en silicio. (Fuente: tomado de "Diffusion and Diffusion Induced Defects in Silicon", por U. Gösele. En R. Bloor, M. Flemings y S. Mahajan (Eds.), Encyclopedia of Advanced Materials, vol. 1, 1994, p. 631, fig. 2. Copyright © 1994, Pergamon Press. Reproducido con autorización de los autores.)

Sección 5-4 Energía de activación en la difusión

- 5-20 A veces la energía de activación se expresa en eV/átomo. Por ejemplo, véase la figura 5-21 que ilustra los coeficientes de difusión de iones en distintos óxidos. Convierta eV/átomo en joules/mol.

- 5-21 Calcule la energía de activación de la difusión de P en Si (Fig. 5-19).
- 5-22 Calcule la energía de activación de la difusión de B en Si (Fig. 5-19).
- 5-23 Calcule la energía de activación de la difusión de H en Si (Fig. 5-19).
- 5-24 El coeficiente de difusión para Cr^{+3} en Cr_2O_3 es $6 \times 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{s}$ a 727°C , y es $1 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ a 1400°C . Calcule
- la energía de activación y
 - la constante D_0 .
- 5-25 El coeficiente de difusión para O^{2-} en Cr_2O_3 es $4 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ a 1150°C , y de $6 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ a 1715°C . Calcule
- la energía de activación y
 - la constante D_0 .
- 5-26 Sin ver los datos reales, ¿puede usted pronosticar si la energía de activación para la difusión de carbono en hierro FCC será mayor o menor que en hierro BCC? Explique por qué.
- 5-27 Con los datos de coeficientes de difusión de distintos iones en óxidos (Fig. 5-21), calcule la energía de activación para la difusión de O^{2-} en zirconia estabilizada con óxido de calcio (CaO). Suponga que el CaO está en 14 por ciento mol.

Sección 5-5 Velocidad de difusión (primera ley de Fick)

- 5-28 ¿Quién fue el primero en experimentar la implantación de lentes de contacto en ojos humanos?
- 5-29 Escriba la primera ley de Fick de la difusión. Explique con claridad qué significa cada término.
- 5-30 ¿Cuál es la diferencia entre difusividad y coeficiente de difusión?

Sección 5-6 Factores que afectan la difusión

- 5-31 Escriba la ecuación que describe la dependencia de D respecto a la temperatura.
- 5-32 Explique en forma breve la dependencia de D respecto a la concentración de la especie que se difunde.
- 5-33 ¿Qué significa el término "difusión cuesta arriba"?
- 5-34 Darken experimentó con un par de difusión de dos aleaciones. La primera tenía 0.44% de C y el resto era hierro.[8,16] La otra aleación contenía 0.48% de C, 3.8% de silicio y el resto era hierro. Después de que se calentó el par de difusión a 1050°C durante varios días, encontró que el carbono se había difundido en realidad desde la muestra de concentración menor hasta la de concentración mayor de carbono. Explique cómo se puede difundir el carbono desde menores hasta mayores concentraciones.

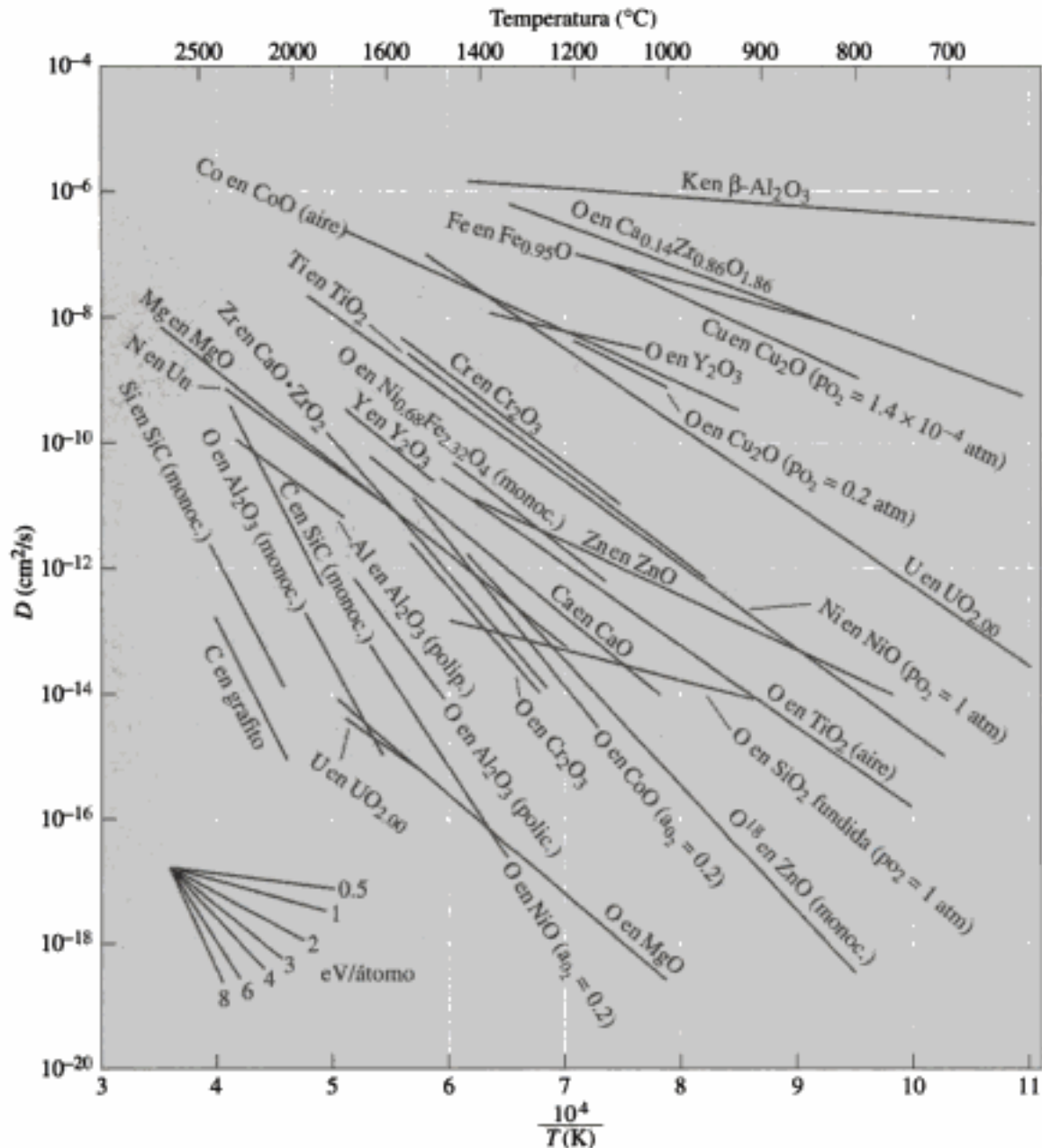


Figura 5-21 (Repetida para los problemas 5-20, 5-27, 5-38 y 5-39). Coeficientes de difusión de iones en distintos óxidos. (Fuente: Adaptado de *Physical Ceramics: Principles for Ceramic Science and Engineering*, por Y.M. Chiang, D. Birnie y W.D. Kingery, fig. 3-1. Copyright © 1997, John Wiley & Sons. Reproducido con autorización.)

- 5-35 ¿Por qué los coeficientes de difusión esperados, de acuerdo con las ecuaciones de química de defectos, no coinciden bien con los datos experimentales para la zirconia estabilizada con itria?
- 5-36 Explique cómo una composición de zirconia estabilizada funciona como el sensor de oxígeno que se usa en los automóviles.
- 5-37 Escriba la ecuación de química de defectos para la incorporación de CaO en ZrO_2 .
- 5-38 Con los datos de coeficientes de difusión de distintos iones en óxidos (Fig. 5-21), calcule la energía de activación para la difusión de iones K en alúmina beta. Los materiales como la alúmina beta tienen un transporte rápido de iones y se han tomado en cuenta para las baterías basadas en sodio y azufre.

Sección 5-9 Difusión y procesamiento de materiales

- 5-78 Ordene los siguientes materiales por coeficiente de difusión creciente: Ar, gas, agua, aluminio monocristal, aluminio líquido a 700 °C.
- 5-79 La mayoría de los metales y las aleaciones se pueden procesar por fusión y colado, pero se prefiere no aplicar este método para procesar metales específicos (por ejemplo, W) y la mayoría de las cerámicas. Explique por qué.
- 5-80 ¿Qué es el sinterizado? ¿Cuál es la fuerza impulsora del sinterizado?
- 5-81 ¿Qué significa metalurgia de polvos?
- 5-82 ¿Qué significa sinterizado en fase líquida? ¿Cómo se forma la fase líquida?
- 5-83 ¿Qué le sucede a la fase líquida cuando se termina el sinterizado?
- 5-84 ¿Por qué hay crecimiento de grano? ¿Qué significa crecimiento normal y anormal de grano?
- 5-85 ¿Por qué se espera que la resistencia de muchos materiales metálicos baje al aumentar su tamaño de grano?
- 5-86 Durante la solidificación de una aleación Cu-Zn, se observa que la composición no es uniforme. Si se calienta la aleación a 600 °C durante tres horas, la difusión del zinc ayuda a hacer más uniforme la composición. ¿Qué temperatura se necesitaría si se deseara hacer este tratamiento de homogenización en 30 minutos?
- 5-87 Una parte de cerámico de MgO se sinteriza exitosamente a 1700 °C durante 90 minutos. Para reducir al mínimo los esfuerzos térmicos durante el proceso, se pretende reducir la temperatura a 1500 °C. ¿Qué limitará la rapidez con que se puede hacer la sinterización: la difusión de iones de magnesio o la difusión de iones oxígeno? ¿Qué tiempo se necesitará a la menor temperatura?
- 5-88 Una aleación de Cu-Zn tiene un diámetro inicial de grano de 0.01 mm. A continuación se calienta esa aleación y se permite que haya crecimiento de grano. Los tiempos necesarios para que crezcan los granos a un diámetro de 0.30 mm son:

Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)
500	80 000
600	3 000
700	120
800	10
850	3

Determine la energía de activación para el crecimiento del grano. ¿Se correlaciona con la difusión del zinc en el cobre? (Sugerencia: tenga en cuenta que la velocidad es recíproca al tiempo.)

- 5-89 ¿Cuáles son las ventajas de usar prensado en caliente y prensado isostático en caliente, en comparación con la sinterización normal?
- 5-90 ¿Cómo falla el filamento de tungsteno de una lámpara incandescente (o foco)?
- 5-91 Una hoja de oro se une por difusión a una hoja de plata, en una hora a 700 °C. A 500 °C se requieren 440 horas para obtener el mismo grado de unión, y a 300 °C, la unión requiere 1530 años. ¿Cuál es la energía de activación para el proceso de unión por difusión? ¿Qué controlará la velocidad de unión, la difusión del oro o la difusión de la plata? (Sugerencia: tenga en cuenta que la velocidad es recíproca al tiempo.)



Problemas de diseño

- 5-92 Diseñe un tanque esférico cuya pared sea de 2 cm de espesor que asegure que no se pierdan más de 50 kg de hidrógeno por año. El tanque, que funcionará a 500 °C, se puede fabricar con níquel, aluminio, cobre o hierro. El coeficiente de difusión del hidrógeno y el costo de cada libra de material se muestra a continuación:

Datos de difusión

Material	D_0 (cm ² /s)	Q cal/mol	Costo (\$/lb)
Níquel	0.0055	8900	4.10
Aluminio	0.16	10 340	0.60
Cobre	0.011	9380	1.10
Hierro (BCC)	0.0012	3600	0.15

- 5-93 Un engrane de acero contiene inicialmente 0.10% de C, y se va a cementar de tal modo que el contenido de carbono a una profundidad de 0.05 pulg sea 0.50%. Se puede generar un gas cementante para que la superficie tenga un contenido de entre 0.95% y 1.15% de C. Diseñe un tratamiento térmico de cementación adecuado.
- 5-94 Cuando una válvula fundida de cobre y níquel se solidifica bajo condiciones fuera de equilibrio, se observa que la composición de la aleación varía bastante dentro de una distancia de 0.005 cm. Por lo general,

se puede eliminar esta diferencia de concentraciones calentando la aleación durante ocho horas a 1200 °C; sin embargo, a veces ese tratamiento hace que la aleación comience a fundirse y la parte se destruye. Diseñe un tratamiento térmico que permita eliminar la falta de uniformidad sin peligro de fusión. Suponga que el costo de funcionamiento del horno, por hora, se duplica cada 100 °C de aumento de temperatura.

- 5-95 Suponga que la concentración de fósforo (P) en la superficie de silicio donde se va a difundir es 10^{21} átomos/cm³. Se debe diseñar un proceso, llamado etapa de predeposición, de modo que la concentración de P (c_1 para el paso 1) a 0.25 micrómetros de profundidad sea 10^{13} átomos/cm³. Suponga que esto se hace a una temperatura de 1000 °C y que el coeficiente de difusión de P en Si a esa temperatura es 2.5×10^{-14} cm²/s. Suponga que el proceso se lleva a cabo durante un tiempo total de ocho minutos. Calcule el perfil de concentración (es decir, C en función de la profundidad que, en este caso, se determina con la ecuación siguiente). Observe que se usa la función de error complementario.[17]

$$c_1 = (x, t_1) = c_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right) \right]$$

Use distintos valores de x para generar y graficar este perfil de P durante la etapa de predeposición.

Problemas en computadora

- 5-96 *Cálculo de coeficientes de difusión.* Escriba un programa de computadora que pida al usuario ingresar los datos de energía de activación Q y el valor de D_0 . A continuación, el programa debe solicitar el ingreso de un intervalo válido de temperaturas. Cuando se ejecute el programa, debe proporcionar los valores de D en función de la temperatura, en los intervalos que elija el usuario. Debe convertir las unidades de Q , D_0 y temperatura a las unidades correctas. Por ejemplo, si el usuario teclea las temperaturas en °F, el programa debe comprobarlo, reconocerlo y convertir la temperatura a K. También debe hacer una advertencia precautoria acerca de las hipótesis normales que se hacen. Por ejemplo, debe advertir al usuario que no se están teniendo en cuenta los efectos de todos los cambios posibles en las

estructuras cristalinas dentro del intervalo de temperaturas especificado. Compruebe la validez de sus programas con ejemplos del libro y también con otros problemas que pueda haber resuelto con una calculadora.

- 5-97 *Comparación de velocidades de reacción.* Escriba un programa de computadora que pida al usuario ingresar la energía de activación de una reacción química. A continuación, debe pedir el ingreso de dos temperaturas a las que se deben comparar las velocidades de reacción. Con el valor de la constante de los gases y la energía de activación, el programa debe proporcionar la relación de las velocidades de reacción. Se deben tener en cuenta distintas unidades para la energía de activación.
- 5-98 *Tratamiento térmico de cementación.* El programa debe pedir al usuario el ingreso de la concentración de carbono en la superficie (c_s) y la concentración en el interior (c_0). También debe pedir al usuario la temperatura y el valor de D , o los valores de D_0 y Q que permitan calcular D . A continuación, debe proporcionar el resultado del perfil de concentración en forma tabular. Las distancias a las que se deben calcular las concentraciones de carbono tiene que proporcionarlas el usuario, o definirlas la persona que escriba el programa. También debe ser posible calcular los tiempos de tratamiento térmico, si el usuario proporciona un valor de la concentración que se necesita a determinada profundidad. El programa necesitará el cálculo de la función de error. El lenguaje de programación o la hoja de cálculo que usted use puede tener incorporada esa función. Si ese es el caso, use esa función. También puede usted calcular la función de error como desarrollo de la siguiente serie:

$$\operatorname{erf}(z) = 1 - \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2} \left(\frac{1}{z} - \frac{1}{2z^3} + \frac{1 \times 3}{2^2} \frac{1}{z^5} - \dots \right) \right]$$

o bien usar una aproximación

$$\operatorname{erf}(z) = 1 - \left(\left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \right] \frac{e^{-z^2}}{z} \right)$$

En estas ecuaciones, z es el argumento de la función de error. También, bajo ciertas condiciones, sabrá usted el valor de la función de error (si se proporcionan todas las concentraciones) y deberá determinar el argumento de la función de error. Esto se puede hacer si una parte del programa hace la prueba comparando distintos valores del argumento de la función de error, y minimizando la diferencia entre

- 5-57 En el procesamiento de un semiconductor se desea dopar en forma selectiva distintas regiones del sustrato semiconductor. Se desea difundir P en silicio en determinada región sin que se difunda en otras regiones. Explique cómo se podría lograr esto. (*Sugerencia:* la difusión de los iones dopantes es mucho menor en el óxido de silicio que en el silicio.)
- 5-58 El coeficiente de difusión del fósforo (P) en Si es $6.5 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s}$ a una temperatura de 1100°C . Suponga que la fuente proporciona una concentración superficial de 10^{21} átomos/ cm^2 y que el tiempo de difusión es dos horas. Suponga que la oblea de silicio no contiene P al principio. Calcule las concentraciones de P a profundidades de 0.5, 1.0 y 2.0 micrómetros.
- 5-59 La conductividad eléctrica de Mn_3O_4 es $8 \times 10^{-18} \text{ ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ a 140°C y es $1 \times 10^{-7} \text{ ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ a 400°C . Determine la energía de activación que controla la dependencia de la conductividad respecto a la temperatura. Explique el proceso por el cual la temperatura controla la conductividad.
- 5-60 Compare la velocidad con que se difunden los iones oxígeno en la alúmina (Al_2O_3) con la velocidad con que se difunden los iones aluminio en la Al_2O_3 a 1500°C . Explique la diferencia.
- 5-61 Compare los coeficientes de difusión de carbono en hierro BCC y hierro FCC a la temperatura de transformación alotrópica de 912°C , y explique la diferencia.
- 5-62 Compare los coeficientes de difusión de hidrógeno y nitrógeno en hierro FCC a 1000°C y explique la diferencia entre los valores.
- 5-63 ¿Qué es cementación? Explique por qué se espera que este proceso cause un aumento en la dureza de la superficie de los aceros al carbono simples.
- 5-64 ¿Qué es el tratamiento térmico de nitruración?
- 5-65 Determinado componente mecánico se debe tratar térmicamente por cementación. Un problema técnico común es que se debe maquinarse cierta parte del componente, y esa parte no se debe endurecer. Explique cómo lograr este objetivo.
- 5-66 Se hace un proceso de cementación en un acero con 0.10% de C, introduciendo 1.0% de C en la superficie, a 980°C , cuando el hierro es FCC. Calcule el contenido de carbono a 0.01 cm, 0.05 cm y 0.10 cm bajo la superficie, después de una hora.
- 5-67 Se calienta a 912°C hierro que contiene 0.05% de C, dentro de una atmósfera que produce 1.20% de C en la superficie, y se mantiene así durante 24 horas. Calcule el contenido de carbono a 0.05 cm bajo la superficie, si
- el hierro es BCC y
 - el hierro es FCC. Explique la diferencia.
- 5-68 ¿Qué temperatura se requiere para obtener 0.50% de C a 0.5 mm bajo la superficie de un acero con 0.20% de C en dos horas, cuando hay 1.10% de C en la superficie? Suponga que el hierro es FCC.
- 5-69 Se va a cementar un acero con 0.15% de C a 1100°C , para obtener 0.35% de C a 1 mm bajo la superficie. Si la composición se mantiene a 0.90% de C en la superficie ¿qué tiempo se requiere?
- 5-70 Se va a cementar un acero con 0.02% de C a 1200°C en cuatro horas, para que un punto que esté 0.6 mm bajo la superficie alcance 0.45% de C. Calcule el contenido de carbono necesario en la superficie del acero.
- 5-71 Un acero para herramientas con 1.2% de C se mantiene a 1150°C expuesto a oxígeno durante 48 horas. El contenido de carbono en la superficie del hierro es cero. ¿A qué profundidad se descarburizará el acero a menos de 0.20% de C?
- 5-72 Un acero con 0.80% de C debe funcionar a 950°C en un ambiente oxidante, donde el contenido de carbono en la superficie del acero es cero. Sólo los 0.02 cm de la parte externa del acero pueden bajar de 0.75% de C. ¿Cuál es el tiempo máximo a la que puede operar la parte de acero?
- 5-73 Un acero con estructura cristalina BCC que contiene 0.001% de N se nitrura a 550°C durante cinco horas. Si el contenido de nitrógeno en la superficie del acero es 0.08%, determine el contenido de nitrógeno a 0.25 mm de la superficie.
- 5-74 ¿Qué tiempo se requiere para nitrurar un acero con 0.002% de N para obtener 0.12% de N a 0.002 pulg bajo la superficie si el tratamiento se realiza a 625°C ? El contenido de nitrógeno en contacto con la superficie es 0.15%.
- 5-75 Se puede hacer un buen tratamiento térmico de cementación a 1200°C durante una hora. Para tratar de reducir el costo del forro refractario del horno, se propone reducir la temperatura de cementación a 950°C . ¿Qué tiempo se necesitará para obtener una cementación equivalente?
- 5-76 ¿Qué significa "efecto Kirkendall"?
- 5-77 ¿Qué significa "plaga púrpura"?

- 5-39 Compare los coeficientes de difusión de oxígeno en alúmina monocristal y policristalina (Fig. 5-21). ¿Qué se puede decir sobre el mecanismo de difusión de iones en esos materiales, con base en la diferencia en estos valores?
- 5-40 En los sólidos, el proceso de la difusión de átomos y de iones es tardado. Explique cómo se aprovecha esto para moldear los vidrios metálicos.
- 5-41 ¿Por qué los vidrios inorgánicos se forman en un enfriamiento relativamente lento de las masas fundidas, mientras que es necesaria una solidificación rápida para formar vidrios metálicos?
- 5-42 Una oblea de silicio de 0.2 mm de espesor se trata de tal modo que se produce un gradiente uniforme de concentración de antimonio. Una superficie contiene un átomo de Sb por 10^8 átomos de Si, y la otra contiene 500 átomos de Sb por 10^8 átomos de Si. El parámetro de red del Si es 0.357 nm (apéndice A). Calcule el gradiente de concentración en
- porcentaje atómico de Sb por cm y
 - átomos de Sb $\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}}$.
- 5-43 Cuando se solidifica una aleación Cu-Zn, una parte de la estructura contiene 25% atómico de zinc y otra parte, a 0.025 mm de distancia, contiene 20% atómico de zinc. El parámetro de red de la aleación FCC es aproximadamente 3.63×10^{-8} cm. Determine el gradiente de concentración en
- porcentaje atómico de Zn por cm;
 - porcentaje en peso de Zn por cm y
 - átomos de Zn $\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}}$.
- 5-44 Para separar un gas con mucho hidrógeno de un gas con poco hidrógeno, ambos a 650 °C, se usa una hoja de hierro BCC de 0.001 pulg. En un lado de la hoja hay 5×10^8 átomos de H/cm³ en equilibrio, y en el otro hay 2×10^3 átomos de H/cm³. Determine
- el gradiente de concentración de hidrógeno y
 - el flujo de hidrógeno a través de la hoja.
- 5-45 Se usa una lámina de 1 mm de hierro FCC para contener nitrógeno en un intercambiador de calor, a 1200 °C. La concentración de N en una superficie es 0.04% de átomos y en la segunda superficie es 0.005% de átomos. Determine el flujo del nitrógeno a través de la hoja, en átomos de N/cm² · s.
- 5-46 Un recipiente esférico de hierro BCC tiene 4 cm de diámetro y 0.5 mm de espesor de pared y contiene nitrógeno a 700 °C. La concentración en la superficie interna es 0.05% de átomos y en la superficie externa es 0.002% de átomos. Calcule la cantidad de gramos que salen del recipiente por hora.

- 5-47 Se debe fabricar una estructura de hierro BCC que permite un paso máximo de 50 g de hidrógeno por año por cada centímetro cuadrado de hierro a 400 °C. Si la concentración de hidrógeno en una superficie es 0.05 átomo de H por celda unitaria, y es 0.001 átomos de H por celda unitaria en la segunda superficie, calcule el espesor mínimo del hierro.
- 5-48 Calcule la temperatura máxima admisible que produzca un flujo de menos de 2000 átomos de H/cm² · s a través de una hoja de hierro BCC, cuando el gradiente de concentración es $-5 \times 10^{16} \frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3 \cdot \text{cm}}$. (Obsérvese el signo negativo del flujo.)

Sección 5-7 Permeabilidad de los polímeros

- 5-49 ¿Qué son los polímeros de barrera?
- 5-50 ¿Qué parámetro define las propiedades de barrera de los polímeros?
- 5-51 ¿Qué factores, además de la permeabilidad, tienen importancia en la selección de un polímero para fabricar botellas de plástico?
- 5-52 El PET amorfo es más permeable al CO₂ que el PET que contiene microcristalitos. Explique por qué.
- 5-53 Explique por qué un globo de hule lleno con helio se desinfla al paso del tiempo.
- 5-54 En comparación con los globos de hule ¿por qué los globos de Mylar™ se desinflan con más lentitud?

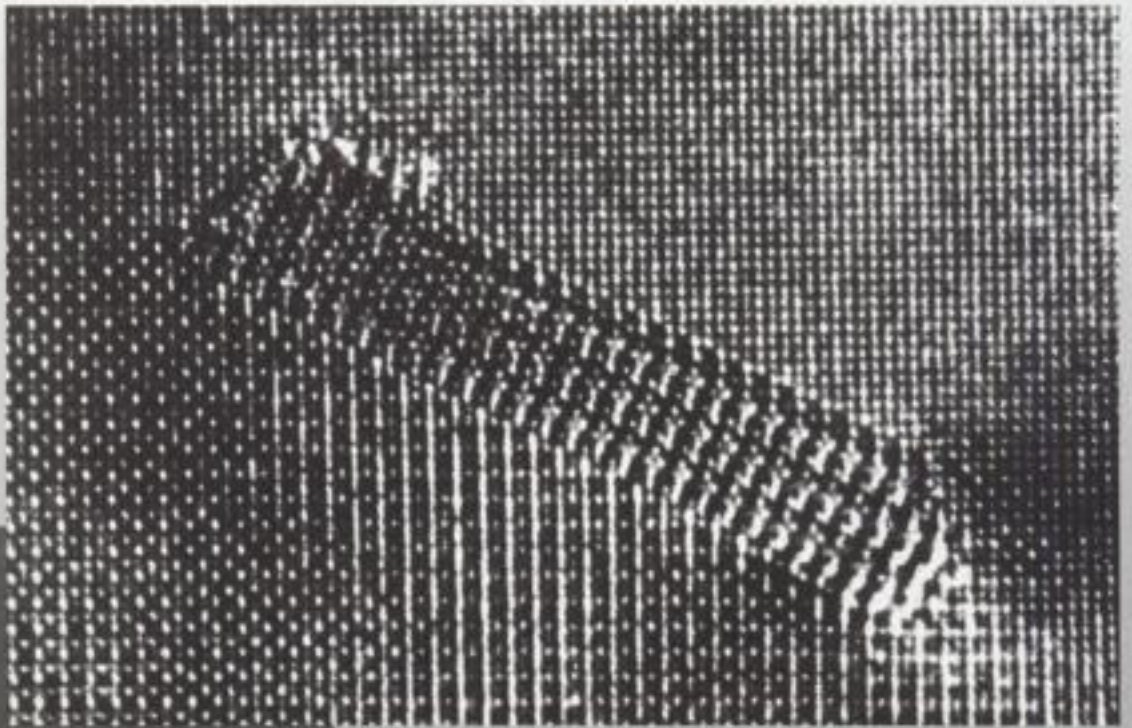
Sección 5-8 Perfil de composición (segunda ley de Fick)

- 5-55 Una oblea de silicio (Si) de 2 mm de espesor se va a dopar con antimonio (Sb). Suponga que la fuente de dopante (mezcla gaseosa de cloruro de antimonio y otros gases) proporciona una concentración constante de 10^{22} átomos de Sb/m³. Si se necesita un perfil de dopante tal que la concentración de Sb a una profundidad de un micrómetro sea 5×10^{23} átomos/m³ ¿cuál será el tiempo del tratamiento de difusión? Suponga que la oblea de silicio no contiene impurezas ni dopantes originalmente. Suponga que la energía de activación para la difusión de Sb en el silicio es 380 kJ/mol y que D_0 para la difusión de Sb en Si es 1.3×10^{-3} m²/s.
- 5-56 Se trata de dopar galio (Ga) en Si. Suponga que el coeficiente de difusión del galio (Ga) en Si a 1100 °C es 7×10^{-13} cm²/s. Calcule la concentración de Ga a una profundidad de 2.0 micrómetros si la concentración superficial de Ga es 10^{23} átomos de Ga/cm³. Los tiempos de difusión son 1, 2 y 3 horas.

el valor de la función de error que usted necesita y el valor de la función que se calculó en forma aproximada.

- 5-99 *Difusión de dopantes en semiconductores.* Desarrolle un programa de computadora que pida al usuario la concentración del dopante en la superficie. A continuación, debe pedir el coeficiente de difusión y un

valor de temperatura. Después, en forma parecida al problema anterior, el programa debe generar un perfil de concentraciones del dopante difundido en función de la profundidad, para determinado tiempo. El programa también debe calcular cuánto tiempo se necesitaría para obtener cierta concentración de dopante a determinada profundidad.



Se muestra un precipitado de Al_2MgCu en la interfaz de una matriz de aluminio (izquierda superior) y una fase de Al_3Li (derecha inferior). Los átomos individuales en cada fase se ven con microscopía de resolución atómica. Precipitados como éstos pueden aumentar en forma importante la resistencia de muchas aleaciones, sin afectar su densidad. (Cortesía de V. Radmilovic y de G.J. Shiftlet, Universidad de Virginia.)

PORTE 2

CAPÍTULO 6

Propiedades y comportamiento mecánico

CAPÍTULO 7

Endurecimiento por deformación y recocido

CAPÍTULO 8

Principios de solidificación

CAPÍTULO 9

Soluciones sólidas y equilibrio de fases

CAPÍTULO 10

Endurecimiento por dispersión y diagramas de fases eutécticas

CAPÍTULO 11

Endurecimiento por dispersión mediante transformaciones de fase y tratamiento térmico

Control de la microestructura y las propiedades mecánicas de los materiales

En esta parte, examinaremos varios métodos para controlar la estructura y las propiedades mecánicas de los materiales. Tres de esos procesos, endurecimiento por tamaño de grano, endurecimiento por solución sólida y endurecimiento por deformación, se basan en la introducción y control de las imperfecciones de las estructuras cristalinas que ya se describieron (capítulo 4).

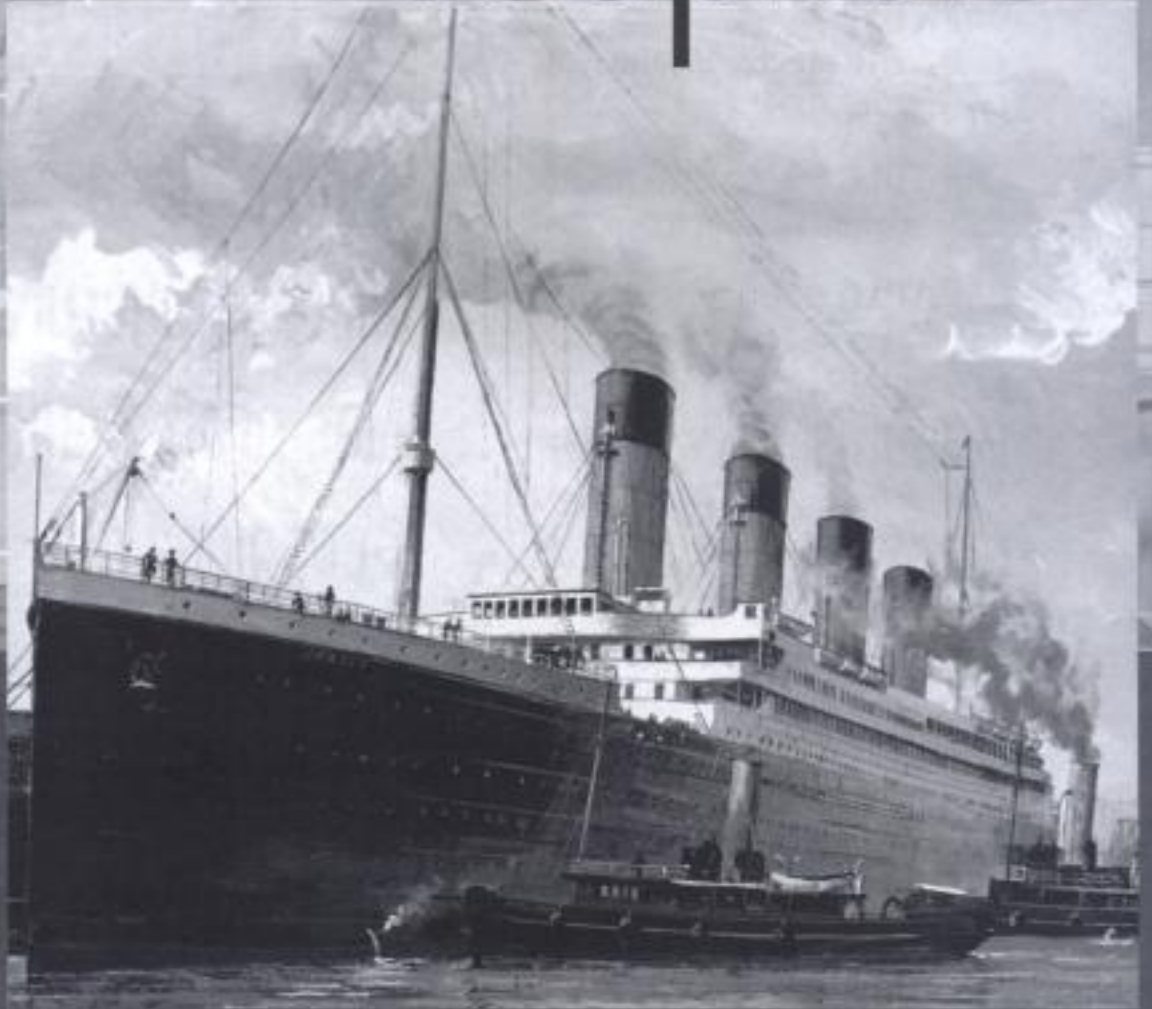
También describiremos el endurecimiento (o reforzamiento) por la creación de materiales constituidos por varias fases, donde cada fase tiene una composición o estructura cristalina distinta. La interfaz entre las fases produce endurecimiento, porque interfiere con el movimiento de dislocaciones en materiales

metálicos. El endurecimiento por dispersión, el endurecimiento por envejecimiento y una diversidad de transformaciones de fase, que con frecuencia se basan en transformaciones alotrópicas, permiten controlar el tamaño, forma y distribución de las fases en un material metálico. El procesamiento del material, como la fundición, el formado por deformación y el tratamiento térmico, también se emplean para controlar la microestructura y las propiedades.

Antes de examinar los mecanismos de reforzamiento, primero examinaremos brevemente las propiedades y ensayos mecánicos de los materiales.

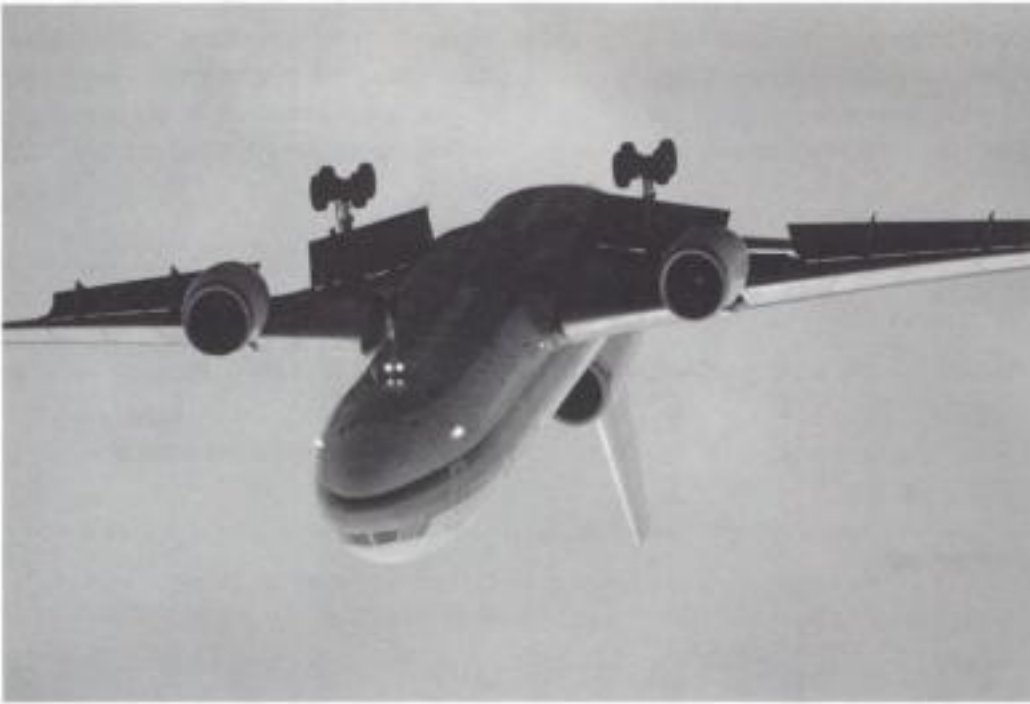
By Arkanosant...

Capítulo



Algunos materiales se vuelven frágiles cuando las temperaturas son bajas y las velocidades de deformación son altas. Se ha demostrado que la composición química especial del acero que se usó en el *Titanic* y los esfuerzos asociados en la fabricación y fragilización de este acero, al someterlo a bajas temperaturas, fueron factores que contribuyeron a la falla del casco del barco. (Cortesía de Getty Images.)

Figura 6-1 Los aviones, como el que aquí se muestra, usan aleaciones de aluminio y materiales compuestos reforzados con fibra de carbono. (Cortés de Getty Images.)



En muchas de las tecnologías emergentes en la actualidad, se hace hincapié en las propiedades mecánicas de los materiales que se usan. Por ejemplo, en la fabricación de aviones, las aleaciones de aluminio o los materiales compuestos reforzados con carbono, usados para componentes de aviones, deben ser ligeros, resistentes y deben resistir cargas mecánicas cíclicas durante un periodo largo y predecible (Fig. 6-1). Los aceros empleados en la construcción de estructuras, como en edificios y puentes, deben tener la resistencia adecuada como para que se puedan construir sin poner en peligro la seguridad. Los plásticos para fabricación de tubos, válvulas, pisos, etc., también deben tener una resistencia mecánica adecuada. Los materiales como el

Importancia tecnológica

6-1

sentar los conceptos básicos asociados con las El objeto principal de este capítulo es pre-

maches débiles y errores de diseño. trado que también contribuyeron a esa falla re- buque.[2,3] Algunos investigadores han demos- res que contribuyeron a la falla del casco del al someterlo a temperaturas bajas, fueron facto- con la fabricación y la fragilización de ese acero, ro usado en el *Titanic* y los esfuerzos asociados demostrado que la composición química del ace-

propiedades mecánicas. Aprenderemos términos básicos como dureza, esfuerzo, deformación, rapidez de deformación, tenacidad a la fractura, deformación elástica y plástica, viscoelasticidad, fatiga, fluencia, etc. También revisaremos algunos de los procedimientos básicos de ensayo que se usan para evaluar muchas de esas propiedades. Estos conceptos se describirán junto con ejem- plos de aplicaciones en el mundo real.

demostrado que la composición química del acero usado en el *Titanic* y los esfuerzos asociados con la fabricación y la fragilización de ese acero, al someterlo a temperaturas bajas, fueron factores que contribuyeron a la falla del casco del buque.[2,3] Algunos investigadores han demostrado que también contribuyeron a esa falla remaches débiles y errores de diseño.

El objeto principal de este capítulo es presentar los conceptos básicos asociados con las

propiedades mecánicas. Aprenderemos términos básicos como dureza, esfuerzo, deformación, deformación elástica y plástica, viscoelasticidad, rapidez de deformación, tenacidad a la fractura, fatiga, fluencia, etc. También revisaremos algunos de los procedimientos básicos de ensayo que se usan para evaluar muchas de esas propiedades. Estos conceptos se describirán junto con ejemplos de aplicaciones en el mundo real.

6-1

Importancia tecnológica

En muchas de las tecnologías emergentes en la actualidad, se hace hincapié en las propiedades mecánicas de los materiales que se usan. Por ejemplo, en la fabricación de aviones, las aleaciones de aluminio o los materiales compuestos reforzados con carbono, usados para componentes de aviones, deben ser ligeros, resistentes y deben resistir cargas mecánicas cíclicas durante un periodo largo y predecible (Fig. 6-1). Los aceros empleados en la construcción de estructuras, como en edificios y puentes, deben tener la resistencia adecuada como para que se puedan construir sin poner en peligro la seguridad. Los plásticos para fabricación de tubos, válvulas, pisos, etc., también deben tener una resistencia mecánica adecuada. Los materiales como el



Figura 6-1 Los aviones, como el que aquí se muestra, usan aleaciones de aluminio y materiales compuestos reforzados con fibra de carbono. (Cortesía de Getty Images.)

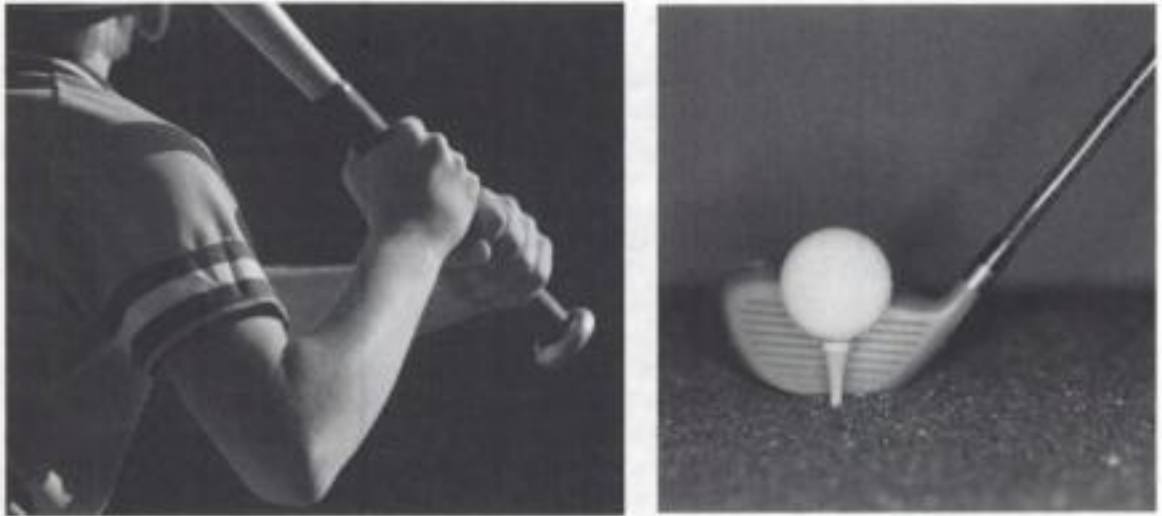


Figura 6-2 Los materiales que se usan en los equipos deportivos deben ser ligeros, rígidos, tenaces y deben resistir impactos. (Cortesía de Getty Images.)

grafito pirolítico o las aleaciones de cobalto, cromo y tungsteno, que se usan como prótesis en válvulas cardíacas, no deben fallar.[4] En forma parecida, el desempeño de las pelotas de béisbol, los palos de cricket, las raquetas de tenis, los palos de golf, los esquís y demás equipo deportivo no sólo dependen de la resistencia y el peso de los materiales que se usan, sino también de su capacidad para funcionar bajo una carga de “impacto” (Fig. 6-2). Es fácil apreciar la importancia de las propiedades mecánicas en muchas de estas aplicaciones a “cargas dinámicas.”

En los capítulos 1 y 2 aprendimos que se usan materiales diseñados avanzados en tecnologías basadas en propiedades electrónicas, magnéticas, ópticas, biológicas y otras más. En la mayoría de esas aplicaciones, también las propiedades mecánicas del material desempeñan un papel importante. Por ejemplo, una fibra óptica debe tener cierto grado de resistencia para tolerar los esfuerzos que encuentre durante su aplicación. Una aleación biocompatible de titanio para un implante de hueso debe tener la suficiente resistencia y tenacidad como para sobrevivir sin fallar durante muchos años en el cuerpo humano. Un recubrimiento resistente a las rayaduras, sobre los lentes ópticos, debe resistir la abrasión mecánica. Una aleación de aluminio o un sustrato de vitrocerámica usados como base para fabricar unidades de disco duro debe tener la suficiente resistencia mecánica, para que no se rompa o agriete durante un funcionamiento que requiere la rotación a altas velocidades. De igual modo, los paquetes electrónicos que se usan para guardar *chips* o *microcontroladores* de semiconductores y las arquitecturas de película delgada formadas sobre el *chip* semiconductor deben resistir los esfuerzos encontrados en diversas aplicaciones, así como los que se presentan durante el calentamiento y enfriamiento de los dispositivos electrónicos. La robustez mecánica de los dispositivos pequeños preparados con sistemas microelectromecánicos (*MEMS*, por sus siglas en inglés) y en nanotecnología también es importante. El vidrio flotado de los automóviles y los edificios debe tener suficiente resistencia mecánica y contra el astillado. Muchos componentes diseñados con plásticos, metales y cerámicos no sólo deben tener la tenacidad y la resistencia adecuadas a temperatura ambiente, sino también a temperaturas relativamente altas y bajas. Lo que queremos decir es muy sencillo; las propiedades mecánicas de un material y las de un componente son críticas en muchas aplicaciones en las cuales lo principal en el funcionamiento pueden ser las propiedades electrónicas, ópticas, magnéticas, biológicas u otras más.

Para aplicaciones sujetas a cargas dinámicas, se seleccionan materiales diseñados comparando sus propiedades mecánicas con las especificaciones de diseño y las condiciones de servicio necesarias en el componente. El primer paso en el proceso de selección requiere un

análisis de la aplicación del material, para determinar sus características más importantes. ¿Debe ser resistente, rígido o dúctil? ¿Se someterá a una aplicación donde se presente un gran esfuerzo o una fuerza intensa repentina, o gran esfuerzo a temperatura elevada, o esfuerzos cíclicos, o a condiciones corrosivas o abrasivas? Una vez conocidas las propiedades requeridas, se puede hacer una selección preliminar del material adecuado usando diversas bases de datos. Sin embargo, se debe conocer cómo se obtienen las propiedades que muestra el manual, saber qué significan las propiedades y darse cuenta de que las propiedades que aparecen se obtienen en ensayos idealizados que podrán no adecuarse en forma exacta a las aplicaciones técnicas de la vida real. Los materiales con la misma composición química y otras propiedades iguales pueden tener propiedades mecánicas muy distintas, dependiendo de su microestructura. Además, los cambios de temperatura, la naturaleza cíclica de los esfuerzos aplicados, los cambios químicos causados por oxidación, corrosión o erosión, los cambios microestructurales debidos a la temperatura, el efecto de posibles defectos introducidos durante las operaciones de maquinado (rectificación, soldadura, corte, etc.), u otros factores, también pueden tener un gran efecto sobre el comportamiento mecánico de los materiales. Un ingeniero competente y profesional conocerá esas posibilidades y podrá tenerlas en cuenta, junto con la seguridad, costo, impacto ambiental y otros requisitos, al diseñar y fabricar distintos componentes.

También se deben comprender las propiedades mecánicas de los materiales, para que se puedan procesar y obtener formas útiles, empleando técnicas de procesamiento de materiales. El procesamiento de materiales, como por ejemplo, el uso de aceros y plásticos para fabricar carrocerías de automóvil, requiere una comprensión detallada de las propiedades mecánicas de los materiales a distintas temperaturas y condiciones de carga; por ejemplo, el comportamiento mecánico de los aceros y los plásticos con que se fabrican artículos tales como carrocerías aerodinámicas para automóviles. Una de las razones por las cuales los aceros se trefilan, laminan, forjan, extruyen y estampan, igual que muchas otras aleaciones, calentándolas primero a altas temperaturas, es que se vuelven dúctiles a esas temperaturas. De igual modo, se usan cambios favorables en las propiedades de plásticos y vidrios durante su procesamiento para obtener formas distintas (como las fibras ópticas).

En las siguientes secciones, describiremos las propiedades mecánicas de los materiales. Definiremos y describiremos diversos términos para describir las propiedades mecánicas de los materiales diseñados. También se describirán los distintos ensayos con que se determinan las propiedades mecánicas de los materiales.

6-2 Terminología de las propiedades mecánicas

Hay distintas clases de fuerzas o "esfuerzos" que se presentan al tratar las propiedades mecánicas de los materiales. En general, se define el **esfuerzo** como una fuerza que actúa sobre el área unitaria en la que se aplica. En la figura 6-3(a) se ilustran los esfuerzos de tensión, compresión, corte y flexión. La **deformación unitaria** se define como el cambio de dimensión por unidad de longitud. El esfuerzo se suele expresar en Pa (pascales) o en psi (libras por pulgadas cuadradas, por sus siglas en inglés). La deformación unitaria no tiene dimensiones y con frecuencia se expresa en pulg/pulg o en cm/cm.

Al describir el esfuerzo y la deformación unitaria, es útil imaginar que el esfuerzo es la *causa* y la deformación unitaria es el *efecto*. Normalmente, los esfuerzos de tensión y de corte se representan con los símbolos σ y τ , respectivamente. Las deformaciones de tensión y de corte se indican con los símbolos ϵ y γ , respectivamente. En muchas aplicaciones sujetas a cargas dinámicas, intervienen esfuerzos de tensión o de compresión. Los esfuerzos cortantes o de cizallamiento, se suelen encontrar en el procesamiento de materiales en técnicas como la extrusión de polímeros. También se encuentran en aplicaciones estructurales. Obsérvese que aun un esfuerzo tensil simple, aplicado en una dirección, causa un esfuerzo cortante en componentes con otras direcciones (parecido al caso descrito en la ley de Schmid, capítulo 4).

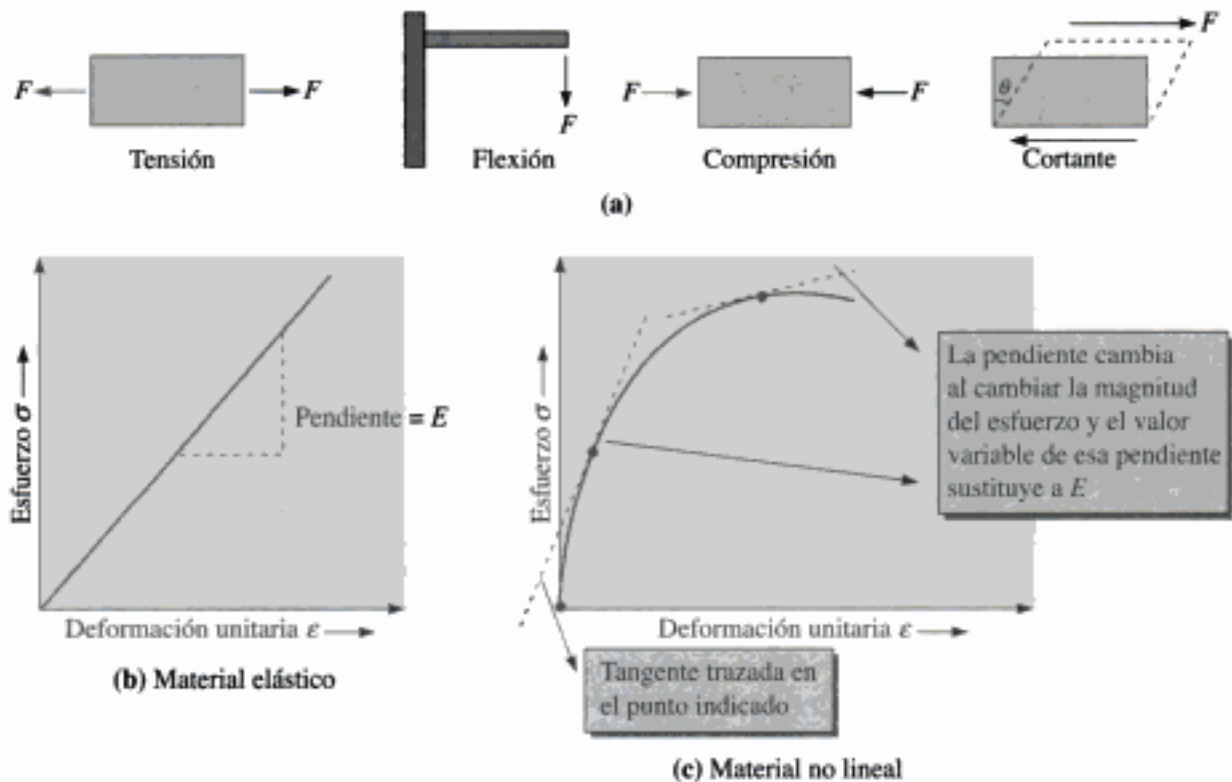


Figura 6-3 (a) Esfuerzos de tensión, compresión, cortante y flexión. (b) Definición del módulo de Young para un material elástico. (c) Para materiales no lineales se usa la pendiente de una tangente como variable que reemplaza el módulo de Young, que es constante.

La **deformación (unitaria) elástica** se define como una deformación restaurable debido a un esfuerzo aplicado. La deformación es "elástica" si se desarrolla en forma instantánea; es decir, se presenta tan pronto como se aplica la fuerza, permanece mientras se aplica el esfuerzo y desaparece tan pronto como se retira la fuerza. Un material sujeto a una deformación elástica no muestra deformación permanente; es decir, regresa a su forma original cuando se retira la fuerza o el esfuerzo. Imagine que un resorte metálico rígido se estira una cantidad pequeña y entonces se suelta. Si regresa con rapidez a sus dimensiones originales, la deformación que se produjo en el resorte era elástica.

En muchos materiales, el esfuerzo y la deformación elásticos siguen una ley lineal. La pendiente en la porción lineal de la curva esfuerzo contra deformación unitaria a tensión define al **módulo de Young** o **módulo de elasticidad** (E) de un material [Fig. 6-3(b)]. Las unidades de E se miden en pascuales (Pa) o en libras por pulgada cuadrada (psi), las mismas que las del esfuerzo. En los **elastómeros** se observan deformaciones elásticas grandes, como en el hule natural o las siliconas, donde la relación entre esfuerzo y deformación elásticos no es lineal. En ellos, la enorme deformación elástica se explica por el enredado y desenredado de moléculas semejantes a resortes (capítulo 15). Al manejar esos materiales, se usa la pendiente de la tangente en cualquier valor determinado del esfuerzo o de la deformación, y se le considera como una cantidad variable que reemplaza al módulo de Young [Fig. 6-3(b)]. El inverso del módulo de Young se llama **flexibilidad** (o **capacidad elástica de deformación**) del material. De forma parecida, se define al **módulo de elasticidad cortante** (G) como la pendiente de la parte lineal de la curva de esfuerzo cortante contra deformación cortante.

La deformación permanente en un material se llama **deformación plástica**. En este caso, cuando se quita el esfuerzo, el material *no* regresa a su forma original. ¡La abolladura en un auto es una deformación plástica! Observe que aquí la palabra "plástica" no indica deformación

en un material plástico o polimérico, sino más bien una clase de deformación en cualquier material.

La rapidez con que se desarrolla la deformación en un material se define como **velocidad de deformación** ($\dot{\epsilon}$ o $\dot{\gamma}$, respectivamente, para la velocidad de deformación por tensión y por cortante). Las unidades de la velocidad de deformación son s^{-1} . Más adelante en este capítulo, veremos que la rapidez con que se deforma un material es importante desde la perspectiva de las propiedades mecánicas. Muchos materiales que se consideran dúctiles se comportan como sólidos frágiles cuando la velocidad de deformación es alta. La masilla Silly Putty®, un polímero de silicona, es un ejemplo de esos materiales. Cuando se estira con lentitud (velocidad de deformación baja), el material se puede estirar grandes cantidades; sin embargo, cuando se estira con rapidez (velocidad de deformación alta) no se da tiempo a que se desenreden y extiendan las grandes moléculas de polímero y, en consecuencia, el material se rompe. Cuando la velocidad de deformación es baja, la masilla Silly Putty® puede manifestar gran ductilidad. Cuando los materiales se sujetan a grandes velocidades de deformación, le llamamos a la carga que la genera como **carga de impacto o dinámica**.

Un **material viscoso** es uno en el cual se desarrolla la deformación durante cierto tiempo, y el material no regresa a su forma original al quitar el esfuerzo. El desarrollo de la deformación toma tiempo, y no está en fase con el esfuerzo aplicado. Además, el material permanece deformado cuando se quita el esfuerzo aplicado (es decir, la deformación es plástica). Un **material viscoelástico** (o **anelástico**) puede concebirse como uno cuya respuesta es intermedia entre la de un material viscoso y un material elástico. El término "anelástico" se suele aplicar en los metales, mientras que "viscoelástico" se suele asociar a los materiales poliméricos. Muchos plásticos (sólidos y fundidos) son viscoelásticos. Un ejemplo frecuente de un material viscoelástico es la masilla Silly Putty®.

En un material viscoelástico, el desarrollo de una deformación permanente se parece al de un material viscoso. Sin embargo, a diferencia de un material viscoso, cuando se quita el esfuerzo aplicado, parte de la deformación desaparece después de cierto tiempo. La recuperación de la deformación es el cambio en la forma de un material después de quitar el esfuerzo que causa la deformación. Una descripción cualitativa del desarrollo de la deformación en función del tiempo, en relación con una fuerza aplicada en los materiales elásticos, viscosos y viscoelásticos se muestra en la figura 6-4. En los materiales viscoelásticos mantenidos bajo deformación constante, al pasar el tiempo, la magnitud del esfuerzo disminuye. A esto se le llama **relajación de esfuerzo**. La recuperación de la deformación y la relajación de esfuerzo son términos distintos y no se deben confundir. Un ejemplo frecuente de la relajación de esfuerzo es el de las cuerdas de nylon tensadas en una raqueta de tenis. Se sabe que la magnitud del esfuerzo, o la "tensión", como la llaman los tenistas, disminuye al paso del tiempo.

Al tratar materiales fundidos, líquidos y dispersiones, como pinturas o geles, se requiere una descripción de la resistencia al flujo o corrimiento bajo la acción de un esfuerzo aplicado. Si la relación entre el esfuerzo aplicado y la **velocidad de deformación cortante** ($\dot{\gamma}$) es lineal, el material se llama **newtoniano**. La pendiente del esfuerzo cortante en función de la deformación cortante en régimen estacionario se define como **viscosidad** (η) del material. El agua es un ejemplo de un material newtoniano. La siguiente relación define a la viscosidad:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (6-1a)$$

Las unidades de η son Pa-s en el sistema SI, o poises (P) o $\frac{g}{cm \cdot s}$ en el sistema cgs. A veces se usa el término centipoise (cP); 1 cP = 10^{-2} P.

La conversión entre estas unidades es 1 Pa-s = 10 P = 1000 cP.

La **viscosidad cinemática** (ν) se define como:

$$\nu = \eta / \rho \quad (6-1b)$$

donde la viscosidad (η) está en poises y la densidad (ρ) está en g/cm^3 . La unidad de viscosidad cinemática es el stokes (St). En la ecuación, St equivale a cm^2/s . A veces se usa la unidad centistokes (cSt); 1 cSt = 10^{-2} St.

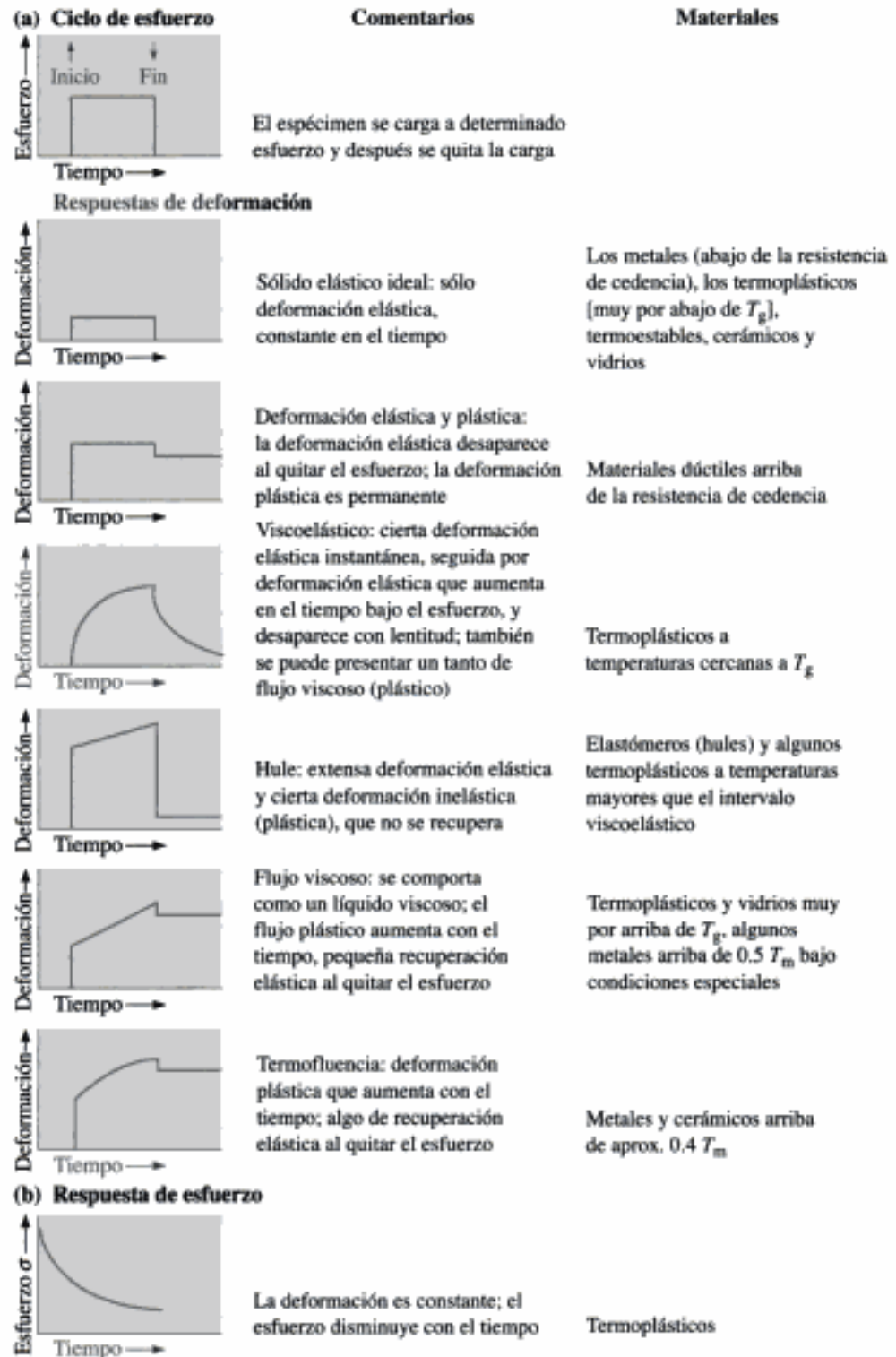


Figura 6-4 (a) Diversas clases de deformación en respuesta a un esfuerzo. (Fuente: Reimpreso de *Materials Principles and Practice*, por C. Newey y G. Weaver (Eds.), 1991, p. 300, fig. 6-9. Copyright © 1991, Butterworth-Heinemann. Reimpreso con autorización de Elsevier Science.) (b) Relajamiento de esfuerzo en un material viscoelástico. Obsérvese que el eje y es de esfuerzo. La deformación es constante.

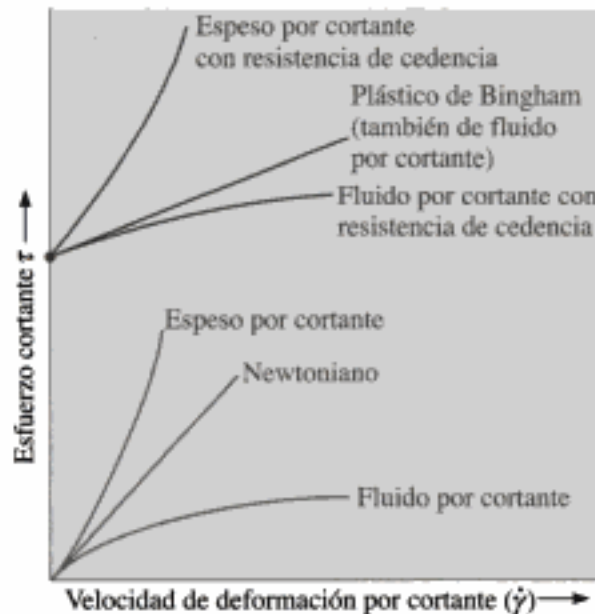


Figura 6-5

Relaciones entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación por cortante, para materiales newtonianos y no newtonianos.

En muchos materiales, la relación entre esfuerzo cortante y velocidad de deformación cortante es no lineal. Esos materiales son **no newtonianos**. La relación de esfuerzo en función de la velocidad de deformación cortante estable en estos materiales se puede describir como:

$$\tau = \eta \dot{\gamma}^m \quad (6-2)$$

en la que el exponente m no es igual a 1.

Los materiales no newtonianos se clasifican como **fluidos por cortante** (o pseudoplásticos) o en **espesos por cortante** (o dilatantes). Las relaciones entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación cortante para distintas clases de materiales se muestra en la figura 6-5. Como se muestra en la figura 6-6(a), la **viscosidad aparente** (η_{ap}) del material disminuye al aumentar la velocidad de deformación cortante en estado estacionario. Si se toma la pendiente de la línea obtenida uniendo el origen con cualquier punto de la curva, lo que se determina es la viscosidad aparente. La viscosidad aparente de un material newtoniano permanece constante al cambiar la velocidad de deformación por cortante. En los materiales dilatantes, la viscosidad aparente disminuye al aumentar la velocidad de deformación cortante. Por ejemplo, en una lata de pintura almacenada, la velocidad de deformación cortante a la que se somete la pintura es muy pequeña y se comporta como muy viscosa. Cuando se toma una brocha y se pinta, la pintura se somete a una gran velocidad de deformación cortante. Ahora esa pintura se comporta como si fuera bastante fluida, delgada o menos viscosa; es decir, muestra una viscosidad aparente pequeña. Es el comportamiento dilatante.

Algunos materiales tienen un comportamiento "plástico ideal". En ellos, el esfuerzo cortante no cambia con la velocidad de deformación constante. Muchos materiales útiles se pueden modelar como **plásticos de Bingham**; se definen con las siguientes ecuaciones:

$$\tau = G\gamma \quad (\text{cuando } \tau \text{ es menor que } \tau_y) \quad (6-3a)$$

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma} \quad (\text{cuando } \tau \geq \tau_y) \quad (6-3b)$$

Esto se muestra en la figura 6-6(b) y 6-6(c).

En estas ecuaciones, τ_y es la **resistencia de cedencia** aparente, y se obtiene interpolando los datos de esfuerzo cortante-velocidad de deformación cortante para un valor de esta última igual a cero. Se definirá la resistencia de cedencia como el valor del esfuerzo que se debe superar para que el material comience a deformarse plásticamente. No se ha demostrado en

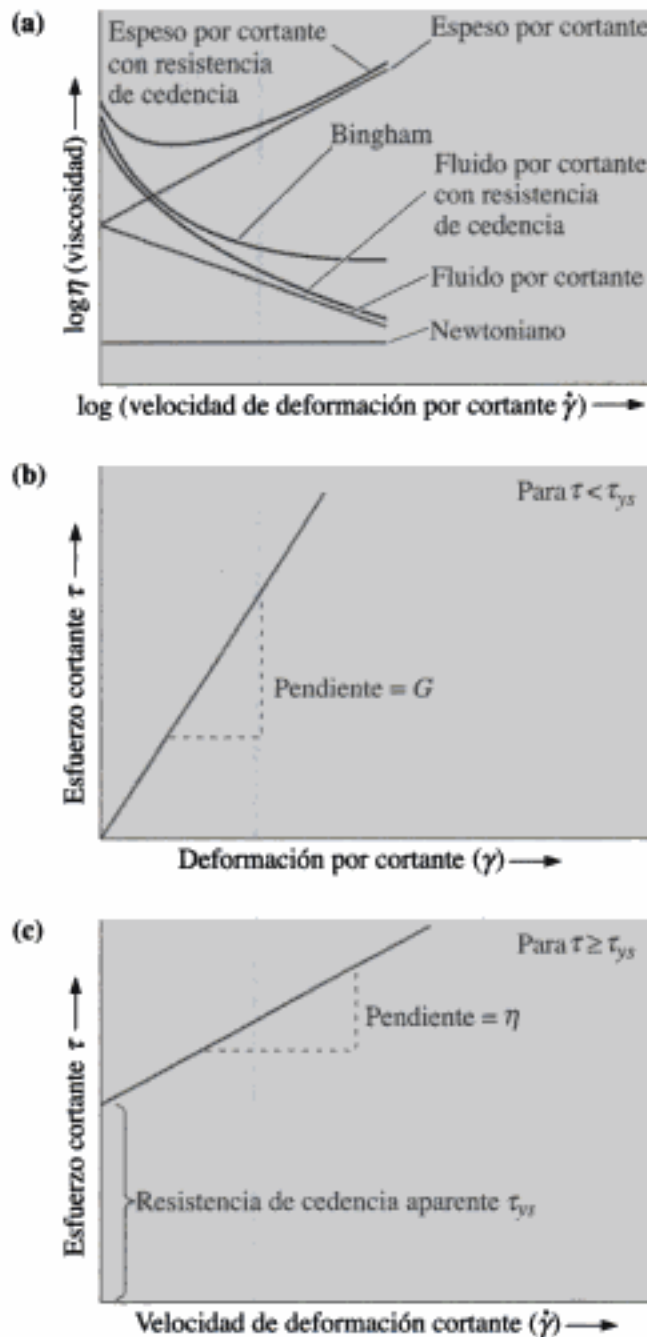


Figura 6-6
(a) Viscosidad aparente en función de $\log$ (cortante) (velocidad de deformación cortante $\dot{\gamma}$) (b) y (c) comportamiento de un plástico de Bingham (ecuaciones 6-3a y b). Obsérvese que en (b), el eje x es deformación por cortante.

forma contundente la existencia de una resistencia real de cedencia (que a veces también se llama esfuerzo de cedencia) para muchos plásticos y dispersiones, como las pinturas. Para demostrar la existencia de la resistencia de cedencia, se necesitan mediciones separadas de esfuerzo en función de la deformación unitaria. Para estos materiales, puede ser que una deformación crítica de cedencia sea mejor para describir el comportamiento mecánico.[5] Muchos lodos cerámicos (dispersiones como las "barbotinas" que se usan en el procesamiento de los cerámicos), polímeros fundidos (en el procesamiento de polímeros), pinturas y geles, así como productos alimenticios (yogurt, mayonesa, catsup, etc.) muestran un comportamientoseudoplástico de Bingham. Obsérvese que los plásticos de Bingham tienen un comportamiento

fluido por cortante o pseudoplástico; es decir, su viscosidad aparente disminuye al aumentar la velocidad de deformación cortante.

Los materiales pseudoplásticos también muestran un **comportamiento tixotrópico**, como las pinturas, lodos de cerámica, polímeros fundidos, geles, etc. Los materiales tixotrópicos suelen contener algún tipo de red de partículas o moléculas. Cuando se les aplica una deformación cortante suficientemente grande, por ejemplo, mayor que la deformación crítica de cendencia, la red o estructura tixotrópica se rompe y los materiales comienzan a fluir. Al detenerse el esfuerzo cortante, la red se comienza a formar de nuevo y aumenta la resistencia al flujo. Los arreglos de partículas o moléculas en la red recién formada son distintos que en la red original. Es por eso que se dice que el comportamiento de los materiales tixotrópicos dependen del tiempo y del historial de las deformaciones. Algunos materiales muestran un aumento en la viscosidad aparente en función del tiempo y a una velocidad de deformación cortante constante. A estos materiales se les llama **reopécticos**.

Las propiedades reológicas de los materiales se determinan con instrumentos llamados viscosímetro o **reómetro**. En ellos, se aplica un esfuerzo o una velocidad de deformación constante al material que se esté evaluando. Se usan distintos arreglos geométricos, como por ejemplo cono y placa, placa paralela, de Couette, etcétera.

En las siguientes secciones describiremos distintas propiedades mecánicas de materiales sólidos y algunos de los métodos de ensayo para evaluarlas.

6-3 El ensayo de tensión: uso del diagrama esfuerzo-deformación unitaria

El ensayo de tensión está muy difundido, porque las propiedades que se obtienen pueden aplicarse en el diseño de distintos componentes. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente. Las velocidades de deformación en un ensayo de tensión suelen ser muy pequeñas ($\dot{\epsilon} = 10^{-4}$ a 10^{-2} s^{-1}). En la figura 6-7 se muestra un arreglo del ensayo; un espécimen o "probeta" estándar (0.505 pulg de diámetro y longitud calibrada de 2 pulg) se coloca en la máquina de prueba y se aplica una fuerza F , llamada **carga**. En la figura 6-8 se muestra una máquina universal de pruebas, en la que se pueden ejecutar tensión y compresión. Para medir la cantidad que se estira el espécimen entre las marcas de calibración cuando se aplica la carga, se usa un **extensómetro** o **galga extensométrica**. Así, lo que se mide es el cambio de longitud del espécimen, Δl , en una longitud determinada, l_0 . En ese

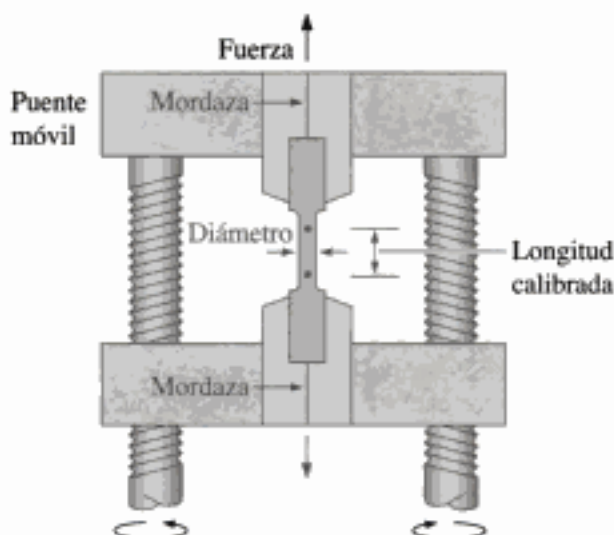


Figura 6-7

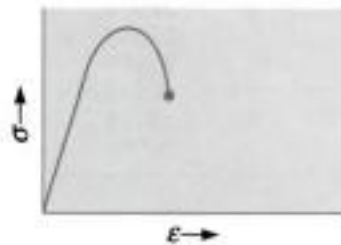
Se aplica una fuerza unidireccional a un espécimen en el ensayo de tensión, mediante el puente o cabezal móvil. El movimiento del puente puede generarse con tornillos sin fin o con un mecanismo hidráulico.



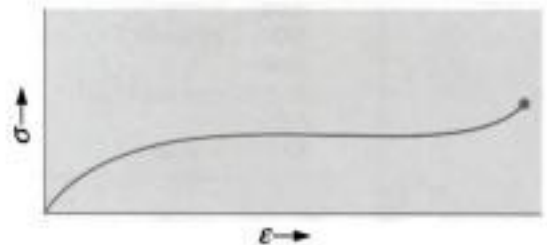
Figura 6-8 Alumnos efectuando un ensayo de tensión, con una máquina automatizada de pruebas. (Cortesía de Pradeep Phulé.)

ensayo de tensión se puede obtener información acerca de la resistencia, el módulo de Young y la ductilidad de un material. Comúnmente, el ensayo de tensión se hace con metales, aleaciones y plásticos. Se pueden hacer ensayos de tensión a cerámicos; sin embargo, no son muy frecuentes, porque la muestra se puede fracturar mientras se está alineando. La siguiente descripción se aplica principalmente al ensayo de tensión de metales y aleaciones. También se describirá en forma breve el comportamiento de polímeros en esfuerzo-deformación.

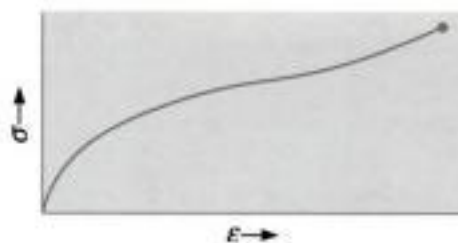
(a) Metal



(b) Material termoplástico arriba de T_g



(c) Elastómero



(d) Cerámicos, vidrios y concreto

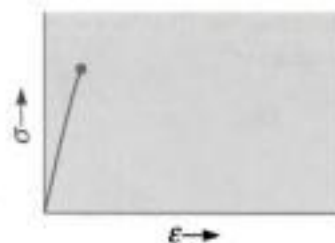


Figura 6-9 Curvas de esfuerzo-deformación a la tensión, para distintos materiales. Obsérvese que son cualitativas.

La figura 6-9 muestra *en forma cualitativa* las curvas de esfuerzo-deformación unitaria normales para (a) un metal, (b) un material termoplástico, (c) un elastómero y (d) cerámicos (o vidrio) bajo velocidades de deformación relativamente pequeñas. En esta figura, las escalas son cualitativas y distintas para cada material. En la práctica, las magnitudes reales de los esfuerzos y las deformaciones pueden ser muy distintas entre sí. Se supone que el material plástico está arriba de su **temperatura de transformación vítrea** (T_g), mientras que los materiales metálicos se asume que están a temperatura ambiente. Los materiales metálicos y termoplásticos muestran una región inicial elástica, seguida por una región plástica no lineal. También se incluye una curva aparte para elastómeros (es decir, hules o siliconas), ya que el comportamiento de esos materiales es distinto del de otros materiales poliméricos. Para los elastómeros, una gran parte de la deformación es elástica y no lineal. Por otra parte, los cerámicos y los vidrios sólo muestran una región elástica lineal y casi no muestran deformación plástica a temperatura ambiente.

Cuando se hace un ensayo de tensión, entre los datos que se anotan están los de carga o fuerza, en función del cambio de longitud (Δl). Ese cambio de longitud, o elongación, se suele medir con una galga extensométrica. La tabla 6-1 muestra el efecto de la carga sobre los cambios de longitud de una barra de ensayo de aleación de aluminio. A continuación, esos datos se convierten en esfuerzo y deformación unitaria. La curva esfuerzo-deformación unitaria se sigue analizando para obtener las propiedades de los materiales, como el módulo de Young, la resistencia de cedencia y otros.

TABLA 6-1 ■ Resultados de un ensayo de tensión ejecutado sobre un espécimen de una aleación de aluminio de 0.505 pulg de diámetro. Longitud inicial (l_0) = 2 pulg

Cambio de longitud medido (Δl)		Calculado	
		Esfuerzo	Deformación
Carga (lb)	(pulg)	(psi)	(pulg/pulg)
0	0.000	0	0
1000	0.001	5 000	0.0005
3000	0.003	15 000	0.0015
5000	0.005	25 000	0.0025
7000	0.007	35 000	0.0035
7500	0.030	37 500	0.0150
7900	0.080	39 500	0.0400
8000 (carga máxima)	0.120	40 000	0.0600
7950	0.160	39 700	0.0800
7600 (fractura)	0.205	38 000	0.1025

Esfuerzo y deformación ingenieriles Los resultados de un solo ensayo se aplican a todos los tamaños y secciones transversales de especímenes de determinado material, siempre que se convierta la fuerza en esfuerzo, y la distancia entre marcas de calibración se convierta a deformación. El **esfuerzo ingenieril** y la **deformación ingenieril** se definen con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Esfuerzo ingenieril} = \sigma = \frac{F}{A_0} \quad (6-4)$$

$$\text{Deformación ingenieril} = \epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (6-5)$$

en donde A_0 es el área de la sección transversal *original* del espécimen antes de que comience el ensayo, l_0 es la distancia *original* entre las marcas de calibración y Δl es el cambio de

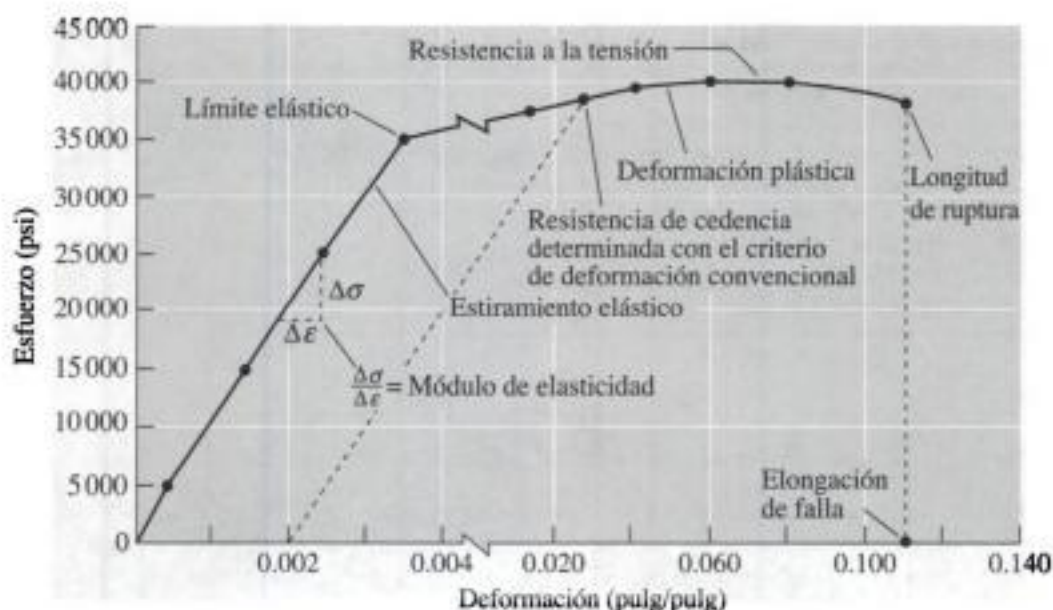


Figura 6-10 Curva esfuerzo ingenieril-deformación ingenieril para una aleación de aluminio, con datos de la tabla 6-1.

longitud o elongación después de haber aplicado la fuerza F . En la tabla 6-1 se incluyen las conversiones de carga y longitud de muestra a esfuerzo y deformación ingenieriles. La curva esfuerzo-deformación ingenieril (Fig. 6-10) se usa para registrar los resultados de un ensayo de tensión.

EJEMPLO 6-1

Ensayo de tensión de una aleación de aluminio

Convierta los datos de carga contra elongación de la tabla 6-1 a esfuerzo y deformación unitaria y trace una curva de esfuerzo-deformación ingenieril.

SOLUCIÓN

Para la carga de 1000 lb:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{1000 \text{ lb}}{(\pi/4)(0.505 \text{ pulg})^2} = \frac{1000 \text{ lb}}{0.2 \text{ pulg}^2} = 5000 \text{ psi}$$

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{0.001 \text{ pulg}}{2.000 \text{ pulg}} = 0.0005 \text{ pulg/pulg}$$

En la tabla 6-1 se proporcionan los resultados de cálculos similares para cada una de las demás cargas y están graficados en la figura 6-10.

Unidades Para presentar los resultados de un ensayo de tensión se usan muchas unidades diferentes. Las unidades más frecuentes para el esfuerzo son megapascuales (MPa) y libras por pulgada cuadrada (psi, por sus siglas en inglés). Entre las unidades de la deformación están pulgada/pulgada, centímetro/centímetro y metro/metro. Los factores de conversión del esfuerzo se resumen en la tabla 6-2. Como la deformación es adimensional, no se requieren factores de conversión para cambiar de sistema de unidades.

TABLA 6-2 ■ Unidades y factores de conversión

1 libra (lb) = 4.448 newtons (N)
1 psi = 1 libra por pulgada cuadrada
1 MPa = 1 megapascal = 1 meganewton por metro cuadrado (MN/m ²) = 1 newton por milímetro cuadrado (N/mm ²) = 1 000 000 Pa
1 GPa = 1000 MPa = 1 gigapascal
1 ksi = 1000 psi = 6.895 MPa
1 psi = 0.006895 MPa
1 MPa = 0.145 ksi = 145 psi

EJEMPLO 6-2 *Diseño de una varilla de suspensión*

Una varilla de aluminio debe resistir una fuerza aplicada de 45 000 libras. Para asegurar que haya la seguridad suficiente, el esfuerzo máximo en la barra se limita a 25 000 psi. La varilla debe tener cuando menos 150 pulgadas de longitud, pero se debe deformar elásticamente cuando mucho 0.25 pulgadas al aplicarle la fuerza. Diseñe la varilla.

SOLUCIÓN

Se puede usar la definición de esfuerzo ingenieril para calcular el área transversal requerida en la varilla:

$$A_0 = \frac{F}{\sigma} = \frac{45\,000}{25\,000} = 1.8 \text{ pulg}^2$$

La varilla podría tener varias formas, siempre y cuando su superficie transversal sea 1.8 pulg². Si la sección transversal es redonda, el diámetro mínimo para asegurar que el esfuerzo no sea demasiado grande es:

$$A_0 = \frac{\pi d^2}{4} = 1.8 \text{ pulg}^2 \quad \text{o} \quad d = 1.51 \text{ pulg}$$

La deformación elástica máxima admisible es 0.25 pulgadas. Según la definición de deformación ingenieril:

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{0.25 \text{ pulg}}{l_0}$$

En la figura 6-10 se observa que la deformación unitaria esperada para 25 000 psi es 0.0025 pulg/pulg. Si se usa el área transversal determinada con anterioridad, la longitud máxima de la varilla es:

$$0.0025 = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{0.25 \text{ pulg}}{l_0} \quad \text{o} \quad l_0 = 100 \text{ pulg}$$

Sin embargo, la longitud mínima de la varilla debe ser 150 pulgadas. Para producir una varilla más larga, se debe hacer que el área transversal de la misma sea mayor. La deformación unitaria mínima admisible en la varilla de 150 pulgadas es:

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{0.25 \text{ pulg}}{150 \text{ pulg}} = 0.001667 \text{ pulg/pulg}$$

Según la figura 6-10, el esfuerzo aproximado es 16 670 psi, menor que el máximo de 25 000 psi. Entonces, el área transversal mínima es:

$$A_0 = \frac{F}{\sigma} = \frac{45\,000 \text{ psi}}{16\,670 \text{ lb}} = 2.70 \text{ pulg}^2$$

Para satisfacer los requisitos de esfuerzo máximo y de alargamiento mínimo al mismo tiempo, el área transversal de la varilla debe ser 2.7 pulg² como mínimo, o sea que debe tener un diámetro mínimo de 1.85 pulgadas.

Resistencia de cedencia Al aplicar esfuerzo a un material, éste muestra primero una deformación elástica. La deformación que se produce desaparece por completo cuando se elimina el esfuerzo aplicado. Sin embargo, al continuar aumentando el esfuerzo aplicado, el material comienza a mostrar deformación tanto elástica como plástica. Al final, el material "cede" al esfuerzo aplicado. El valor crítico del esfuerzo necesario para iniciar la deformación plástica se llama **límite elástico** del material. En los materiales metálicos, éste es normalmente el esfuerzo necesario para iniciar el movimiento de las dislocaciones o deslizamiento. En los materiales poliméricos, este esfuerzo corresponde al desenredo de las cadenas moleculares del polímero o al deslizamiento de las cadenas entre sí. El **límite de proporcionalidad** se define como el valor del esfuerzo arriba del cual la relación entre esfuerzo y deformación ingenieriles no es lineal.

En la mayoría de los materiales, el límite elástico y el límite de proporcionalidad están bastante cercanos. Sin embargo, ni el valor del límite elástico ni el del límite de proporcionalidad se pueden determinar con precisión. Los valores medidos dependen de la sensibilidad del equipo que se usa. En consecuencia, se define un valor convencional de deformación plástica (normalmente 0.002 o 0.2%, pero no siempre). A continuación, se traza una recta comenzando en este valor desplazado, paralela a la parte lineal de la curva esfuerzo-deformación ingenieril. El valor de esfuerzo que corresponde al cruce de esa recta y la curva de esfuerzo-deformación ingenieril se le define como la **resistencia a la cedencia** y el procedimiento que se ha descrito para determinarlo se le conoce como criterio "offset" o de deformación plástica convencional. En la figura 6-11(a) se muestra la resistencia de cedencia al 0.2% de deformación convencional del hierro colado gris, que es de 40 000 psi. En ingeniería se prefiere usar el esfuerzo de cedencia para fines de diseño.

En algunos materiales, la transición de deformación elástica a flujo plástico es abrupta. Esa transición se llama **fenómeno de punto de fluencia**. En esos materiales, al comenzar la deformación plástica, el valor del esfuerzo baja primero desde el *punto de fluencia superior* (σ_2) [Fig. 6-11(b)]. El valor del esfuerzo sigue decreciendo y oscila en torno a un valor promedio que se define como *punto de fluencia inferior* (σ_1).

La curva esfuerzo-deformación para ciertos aceros al bajo carbono muestra dos puntos de fluencia (o cedencia) [Fig. 6-11(b)]. Se espera que el material se deforme plásticamente en el esfuerzo σ_1 . Sin embargo, los átomos intersticiales agrupados en torno a las dislocaciones interfieren con el deslizamiento y elevan el punto de cedencia a σ_2 . Sólo después de aplicar el esfuerzo σ_2 mayor, se deslizan las dislocaciones. Después de que comienza el deslizamiento en σ_2 , las dislocaciones se alejan de los grupos de átomos pequeños y continúan moviéndose con mucha rapidez en el esfuerzo menor σ_1 .

Cuando se diseñan partes para aplicaciones sujetas a cargas dinámicas, es preferible que haya muy poca o ninguna deformación plástica. En consecuencia, se debe seleccionar un material tal que el esfuerzo de diseño sea bastante menor que la resistencia de cedencia a la temperatura a la que deberá usarse el material. También se puede hacer mayor la sección transversal del material, para que la fuerza aplicada produzca un esfuerzo bastante menor que la resistencia

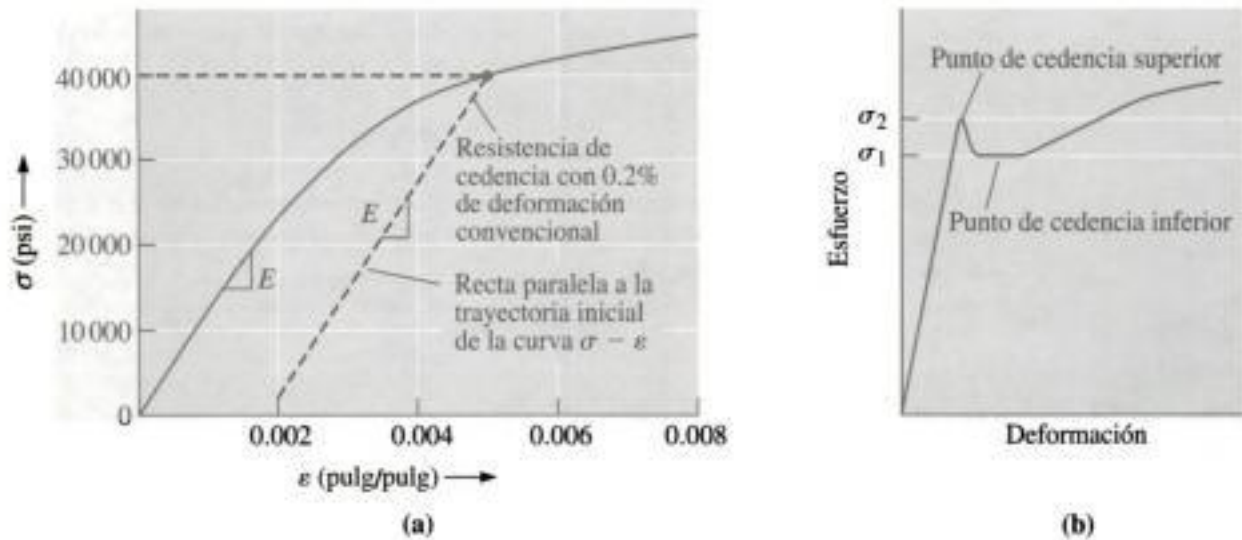


Figura 6-11 (a) Determinación de la resistencia de cedencia con 0.2% de deformación convencional en el hierro colado gris y (b) puntos de cedencia superior e inferior de un acero al bajo carbono.

de cedencia. Por otra parte, cuando se desea conformar los materiales en componentes (por ejemplo, tomar una lámina de acero y formar un chasis de automóvil), se deben aplicar esfuerzos bastante mayores que la resistencia de cedencia.

Resistencia a la tensión El esfuerzo obtenido con la máxima fuerza aplicada es la **resistencia a la tensión** o **resistencia a la tracción** (σ_{TS}), que es el esfuerzo máximo en la curva esfuerzo-deformación ingenieril. En muchos materiales dúctiles, la deformación no permanece uniforme. En algún punto, una región se deforma más que otras y se presenta una reducción local grande de la sección transversal en dicho punto (Fig. 6-12). Esta región de deformación local se llama "cuello". A este fenómeno se le llama **estricción** o **formación de cuello**. Como el área transversal es menor en ese punto, se necesita una fuerza menor para continuar la deformación, y el esfuerzo ingenieril, calculado con el área original A_0 , decrece. La resistencia a la tensión es el esfuerzo en el cual comienza la estricción en los materiales dúctiles. Muchos metales y polímeros dúctiles

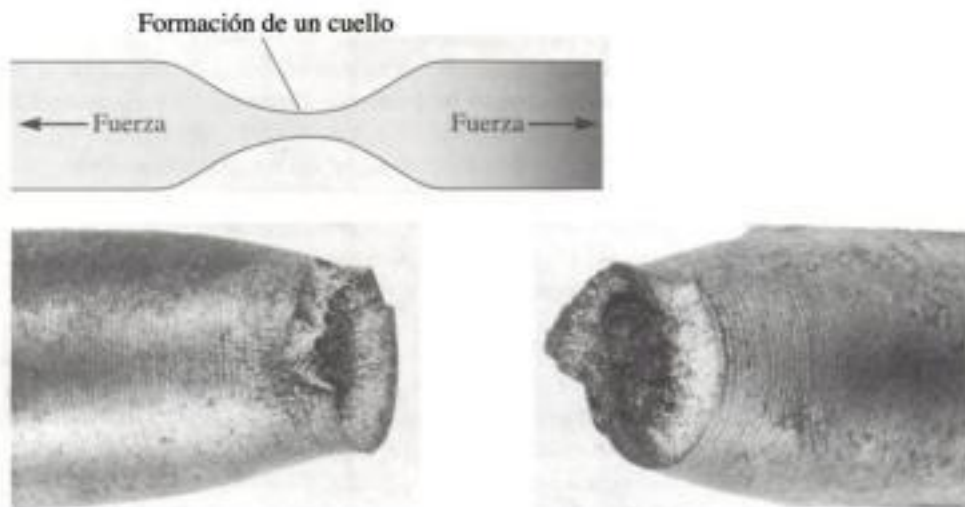


Figura 6-12 Deformación localizada de un material dúctil durante un ensayo de tensión; se produce una región de cuello. En la fotografía se observa la parte del cuello en una muestra fracturada.

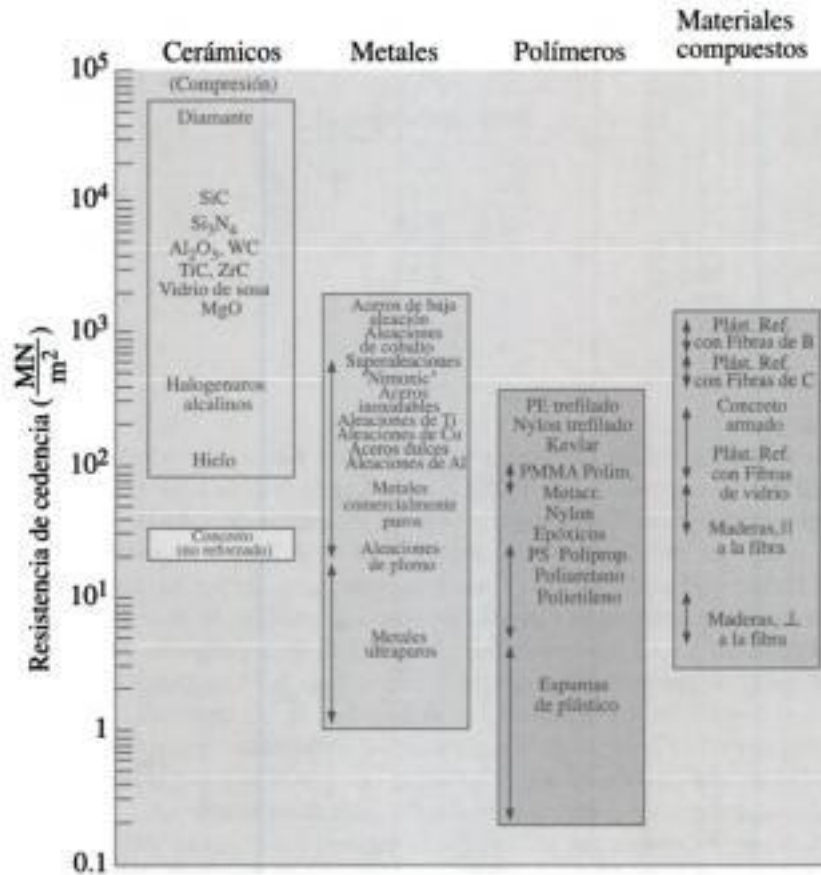


Figura 6-13 Valores característicos de resistencia para diversos materiales. (Fuente: Reimpreso de Engineering Materials I, 2a. ed., M.F. Ashby y D.R.H. Jones, 1996, fig. 8-12, p. 85. Copyright © Butterworth-Heinemann. Reimpreso con autorización de Elsevier Science.)

muestran el fenómeno de formación de cuello. En el ensayo de compresión, los materiales se ensanchan; por consiguiente, la estricción sólo se observa en los ensayos de tensión.

La figura 6-13 muestra valores normales de resistencia de cedencia para distintos materiales diseñados. La resistencia de cedencia de los metales puros es menor. Por ejemplo, los metales ultrapuros tienen una resistencia de cedencia aproximada de $(1 - 10 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2})$. Por otra parte, la resistencia de cedencia de las aleaciones es mayor. El reforzamiento en las aleaciones se logra con los distintos mecanismos que ya se describieron, como el refinamiento del tamaño de grano, formación de solución sólida, endurecimiento por deformación, etc. La resistencia de cedencia de los plásticos y elastómeros en general es menor que la de los metales y aleaciones: hasta de $(10 - 100 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2})$. Los valores para los cerámicos son de resistencia a la compresión, obtenida mediante un ensayo de dureza. La resistencia a la tensión de la mayoría de los cerámicos es mucho menor, aproximadamente de $(\sim 100 - 200 \text{ MPa})$. La resistencia de los vidrios a la tensión es de unos $\sim 70 \text{ MPa}$, y depende de sus imperfecciones en la superficie.

Propiedades elásticas El módulo de elasticidad, o *módulo de Young* (E), es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación unitaria en la región elástica. Esta relación es la **ley de Hooke**: [6]

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (6-6)$$

El módulo tiene una relación estrecha con la energía de enlace atómico (Fig. 2-26). Una pendiente pronunciada de la gráfica fuerza-distancia a la distancia de equilibrio (o interatómica) indica que

TABLA 6-3 ■ Propiedades elásticas y temperaturas de fusión (T_m) de algunos materiales

Material	T_m (°C)	E (psi)	Módulo de Poisson (μ)
Pb	327	2.0×10^6	0.45
Mg	650	6.5×10^6	0.29
Al	660	10.0×10^6	0.33
Cu	1085	18.1×10^6	0.36
Fe	1538	30.0×10^6	0.27
W	3410	59.2×10^6	0.28
Al_2O_3	2020	55.0×10^6	0.26
Si_3N_4		44.0×10^6	0.24

se requieren grandes fuerzas para separar los átomos y hacer que el material se estire en forma elástica. Así, el material tiene un módulo de elasticidad grande. Las fuerzas de enlace y, por consiguiente, el módulo de elasticidad, suelen ser mayores para los materiales de punto de fusión alto (tabla 6-3). En los materiales metálicos, se considera que el módulo de elasticidad es una propiedad *insensible* a la microestructura, porque el valor está muy influido por la fuerza de los enlaces atómicos. El tamaño de grano u otras propiedades microestructurales no tienen un efecto muy grande sobre el módulo de Young. Obsérvese que el módulo de Young depende de factores como orientación de un material monocristalino (es decir, depende de la dirección cristalográfica). Para los cerámicos, el módulo de Young depende de la magnitud de la porosidad. El módulo de Young de un material compuesto depende de la rigidez de los componentes individuales.

El módulo de Young es una medida de la rigidez de un componente. Un componente rígido con módulo de elasticidad grande presenta cambios dimensionales mucho menores cuando el esfuerzo aplicado es relativamente pequeño y, en consecuencia, sólo causa deformación elástica. En la figura 6-4 se compara el comportamiento elástico del acero con el del aluminio. Si se aplica un esfuerzo de 30 000 psi a cada material, el acero se deforma elásticamente 0.001 pulg./pulg., mientras que el aluminio se deforma 0.003 pulg./pulg. En general, la mayoría de los ingenieros consideran que la rigidez es una función del módulo de Young y también de la geometría de un componente.

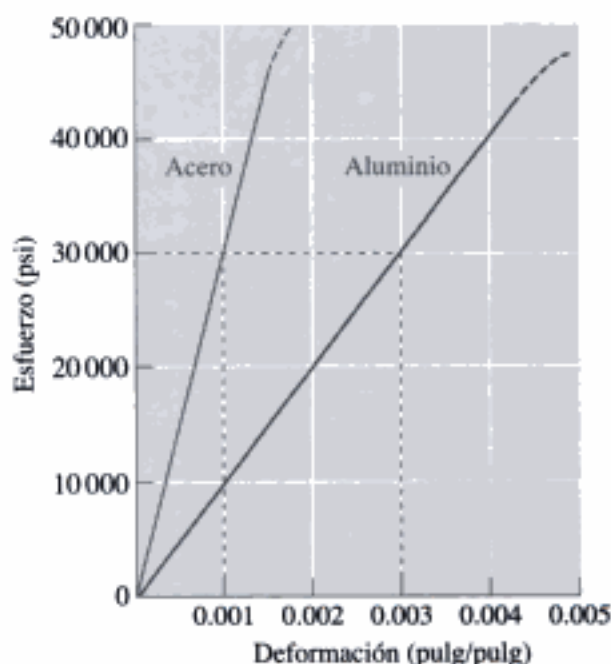


Figura 6-14 Comparación del comportamiento elástico del acero y del aluminio. Para determinado esfuerzo, el aluminio se deforma elásticamente tres veces más que el acero.

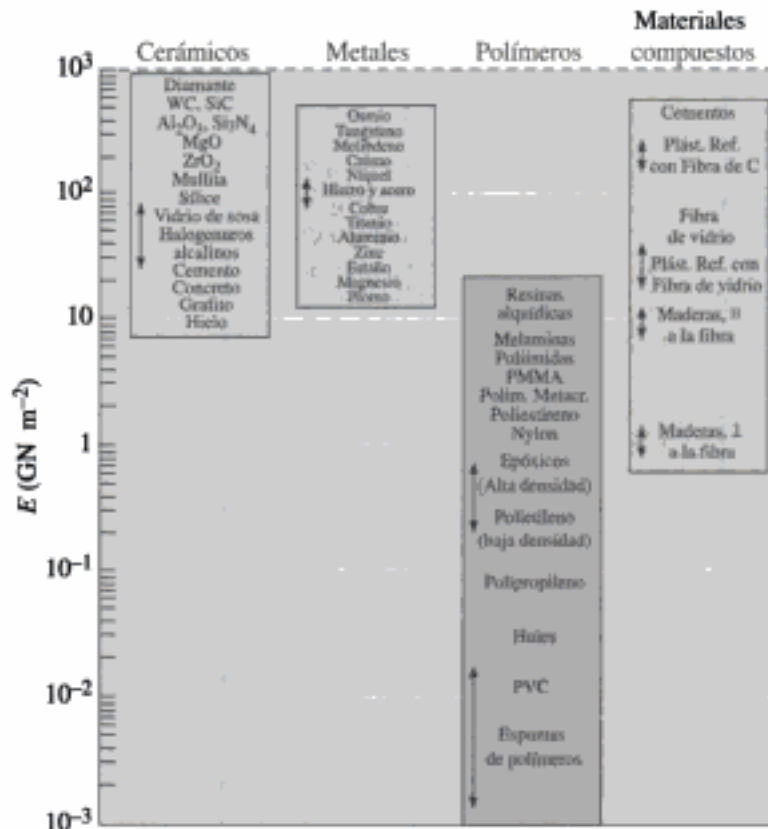


Figura 6-15 Intervalos de módulos elásticos para diversos materiales. (Fuente: Reimpreso de Engineering Materials I, 2a. ed., M.F. Ashby y D.R.H. Jones, 1996, fig. 3-5, p. 35. Copyright © Butterworth-Heinemann. Reimpreso con autorización de Elsevier Science.)

La figura 6-15 muestra los intervalos de módulos de elasticidad para diversos materiales. El módulo de elasticidad de los plásticos es mucho menor que los de los metales, de los cerámicos o de los vidrios. Por ejemplo, el módulo de elasticidad del nylon es 2.7 GPa ($\sim 0.4 \times 10^6$ psi); el módulo de las fibras de vidrio es 72.4 GPa ($\sim 10.5 \times 10^6$ psi). El módulo de Young de materiales compuestos, como los reforzados con fibra de vidrio (GFRF, por sus siglas en inglés) o los reforzados con fibra de carbón (CFRC, por sus siglas en inglés), está entre los valores del polímero de la matriz y de la fibra (fibras de carbono o de vidrio) y depende de sus fracciones volumétricas relativas. El módulo de Young de muchas aleaciones y cerámicos es mayor; en general, llega hasta 413.7 GPa ($\sim 60 \times 10^6$ psi). Los cerámicos, debido a la resistencia de los enlaces iónicos y covalentes, tienen los mayores módulos de elasticidad.

El **módulo de Poisson** μ es el cociente de la deformación elástica longitudinal producida por un esfuerzo de tensión o compresión simple, entre la deformación lateral que sucede simultáneamente:

$$\mu = \frac{-\epsilon_{\text{lateral}}}{\epsilon_{\text{longitudinal}}} \quad (6-7)$$

Para muchos metales en la región elástica, el módulo de Poisson suele ser 0.3, aproximadamente (tabla 6-3). Durante un ensayo de tensión, la relación aumenta más allá de la cedencia hasta 0.5, aproximadamente, porque durante la deformación plástica el volumen permanece constante. Algunas estructuras interesantes muestran una relación de Poisson negativa.[7]

El **módulo de resiliencia** (E_r), o área contenida bajo la parte elástica de una curva de esfuerzo-deformación ingenieril, es la energía elástica que absorbe un material durante la carga y que después se desprende, cuando se quita la carga. Para el comportamiento elástico lineal:

$$E_r = \left(\frac{1}{2}\right)(\text{resistencia de cedencia})(\text{deformación de cedencia}) \quad (6-8)$$

El que un resorte o una pelota de golf funcionen en forma satisfactoria depende de que tengan un módulo de resiliencia alto.

Tenacidad a la tensión La energía absorbida por un material antes de fracturarse se llama **tenacidad a la tensión**, y a veces se determina como el área bajo la curva de esfuerzo-deformación ingenieril; también se llama **trabajo de fractura**. En la sección 6-5 se definirán el esfuerzo y la deformación reales. Como es más fácil determinar el esfuerzo y la deformación ingenieriles, los ingenieros suelen igualar la tenacidad a la tensión con el área bajo la curva esfuerzo-deformación ingenieril.

EJEMPLO 6-3

Módulo de Young de una aleación de aluminio

Con los datos del ejemplo 6-1, calcule el módulo de elasticidad de la aleación de aluminio. Use el módulo para determinar, después de deformarse, la longitud de una barra que inicialmente mide 50 pulgadas. Suponga que la magnitud del esfuerzo aplicado es 30 000 psi.

SOLUCIÓN

Cuando se aplica un esfuerzo de 35 000 psi, se produce una deformación unitaria de 0.0035 pulg/pulg. Entonces:

$$\text{Módulo de elasticidad} = E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{35\,000 \text{ psi}}{0.0035} = 10 \times 10^6 \text{ psi}$$

Según la ley de Hooke:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{30\,000 \text{ psi}}{10 \times 10^6} = 0.0003 = \text{pulg/pulg} = \frac{l - l_0}{l_0}$$

$$l = l_0 + \epsilon l_0 = 50 + (0.0003)(50) = 50.015 \text{ pulg}$$

Ductilidad La **ductilidad** mide la cantidad de deformación que puede resistir un material sin romperse. Se puede medir la distancia entre las marcas de calibración en el espécimen antes y después del ensayo. La **elongación porcentual** describe la deformación plástica permanente antes de la falla (es decir, no se incluye la deformación elástica que desaparece después de la fractura). Obsérvese que la deformación a la falla es menor que la deformación en el punto de ruptura.

$$\% \text{ alargamiento} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 \quad (6-9)$$

donde l_f es la distancia entre las marcas de calibración después de que se ha roto el espécimen.

Un segundo método consiste en medir el cambio porcentual en el área de la sección transversal en el punto de fractura, antes y después del ensayo. La **reducción porcentual de área** describe la cantidad de adelgazamiento que sufre el espécimen durante el ensayo en dicho punto:

$$\% \text{ reducción en área} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \quad (6-10)$$

donde A_f es el área transversal final en la superficie de fractura.

La ductilidad es importante tanto para los diseñadores de componentes sujetos a cargas (dinámicas) como para los fabricantes de semiproductos (barras, varillas, alambres, placas, vigas, fibras, etc.) que usan procesamiento de materiales. El diseñador de un componente prefiere un material que muestre por lo menos cierta ductilidad, de modo que si el esfuerzo aplicado es

demasiado alto, el componente pueda tomar algo del mismo deformándose, y no fallar por fractura frágil. Los fabricantes de componentes ingenieriles (metálicos y poliméricos) desean que el material sea dúctil para moldear formas complicadas sin romper los materiales en el proceso. La ductilidad de los materiales depende de la temperatura y de la velocidad de deformación.

EJEMPLO 6-4 Ductilidad de una aleación de aluminio

La aleación de aluminio del ejemplo 6-1 tiene una longitud final, después de fallar, de 2.195 pulgadas, y en la superficie fracturada el diámetro es 0.398 pulgadas. Calcule la ductilidad de esta aleación.

SOLUCIÓN

$$\% \text{ de elongación} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 = \frac{2.195 - 2.000}{2.000} \times 100 = 9.75\%$$

$$\begin{aligned} \% \text{ de reducción en área} &= \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \\ &= \frac{(\pi/4)(0.505)^2 - (\pi/4)(0.398)^2}{(\pi/4)(0.505)^2} \times 100 \\ &= 37.9\% \end{aligned}$$

La longitud final es menor que 2.205 pulgadas (véase la tabla 6-1), porque después de la fractura se recupera la deformación elástica.

Efecto de la temperatura Las propiedades mecánicas de los materiales dependen de la temperatura (Fig. 6-16). La resistencia de cedencia, la resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad disminuyen cuando las temperaturas son mayores, mientras que la ductilidad suele aumentar. Un fabricante de materiales podrá querer deformar un material a alta temperatura

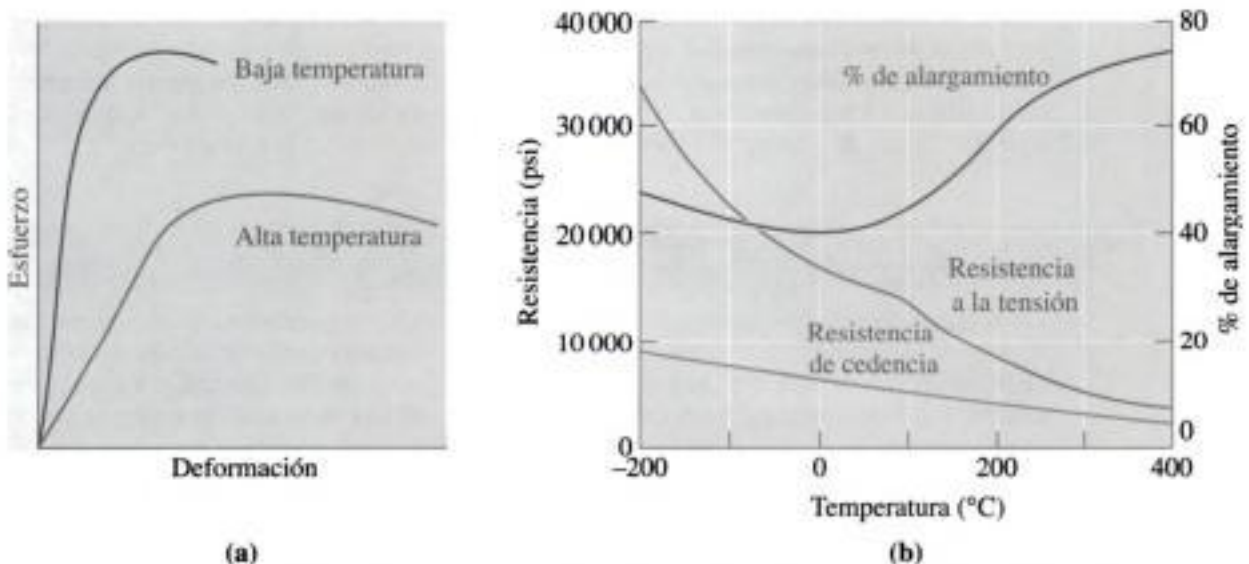


Figura 6-16 Efecto de la temperatura (a) sobre la curva esfuerzo-deformación y (b) sobre las propiedades a tensión de una aleación de aluminio.

(lo que se llama *trabajo en caliente*) para aprovechar la mayor ductilidad y el menor esfuerzo necesarios. Algunos de los lectores habrán oído decir “calentar y golpear” o “golpear cuando el hierro está caliente”. El origen de estas frases se relaciona con la ductilidad que desarrollan muchos materiales metálicos cuando se calientan a mayores temperaturas. Usamos el término “alta temperatura” con una nota precautoria. En esencia, una alta temperatura es algo que se acerca a la temperatura de fusión. Así, 500 °C es una alta temperatura para las aleaciones de aluminio; sin embargo, es una temperatura relativamente baja para el procesamiento de los aceros. En los metales, la resistencia de cedencia disminuye con rapidez a mayores temperaturas, porque los materiales metálicos pueden tener menor densidad de dislocaciones y un aumento en el tamaño de grano, debido a su crecimiento (capítulo 5) o por “recristalización” de nuevos granos que en esencia están libres de dislocaciones (como se describirá después, en el capítulo 7). De igual modo, todo reforzamiento que pueda haber ocurrido por la deformación de precipitados ultrafinos (capítulo 4) también puede disminuir cuando el tamaño de los precipitados comienza a crecer, o los precipitados comienzan a disolverse en la matriz. Describiremos estos efectos con más detalle en capítulos posteriores. Cuando las temperaturas bajan, muchos metales, aunque no todos, se vuelven frágiles.

Las mayores temperaturas también tienen un papel importante en el moldeo de materiales poliméricos y de vidrios inorgánicos. En muchas operaciones de procesamiento de polímeros, como extrusión o el proceso de estirar y soplar (capítulo 4), es deseable la mayor ductilidad de los polímeros a mayores temperaturas. De nuevo, se debe tener precaución al usar el término “alta temperatura”. Para los polímeros, “alta temperatura” indicaría en general que la temperatura es mayor que la temperatura de transición vítrea (T_g). No hay “transición” a esta temperatura, como indica el nombre. Para nuestros fines, la temperatura de transición vítrea es aquella por debajo de la cual los materiales se comportan como materiales frágiles. Arriba de la temperatura de transformación vítrea los plásticos se vuelven dúctiles. La temperatura de transición vítrea no es fija, sino que depende de la rapidez de enfriamiento y también de la distribución de pesos moleculares en el polímero. Muchos plásticos son dúctiles a temperatura ambiente, porque sus temperaturas de transición vítrea son *inferiores* a la temperatura ambiente. Resumiendo, muchos materiales poliméricos se vuelven más duros y más frágiles cuando se exponen a temperaturas menores que sus temperaturas de transición vítrea. Las causas de la pérdida de ductilidad a menores temperaturas en los polímeros y en los materiales metálicos son distintas; sin embargo, es un factor que desempeñó un papel en las fallas del *Titanic* en 1912 y del *Challenger* en 1986.

Los materiales cerámicos y vítreos se consideran en general frágiles a temperatura ambiente. Al aumentar la temperatura, los vidrios pueden fluir mejor y volverse más dúctiles. Por esta razón, el procesamiento del vidrio (por ejemplo, trefilado de fibras o fabricación de botellas) se hace a altas temperaturas. Los cerámicos policristalinos también pueden aumentar su ductilidad a temperaturas mayores, por mecanismos en los que interviene el deslizamiento en los límites de grano y otros fenómenos. Esto se describirá en la sección 6-21.

6-5

Esfuerzo real y deformación real

La disminución del esfuerzo ingenieril al rebasar el punto correspondiente a la resistencia a la tensión de la curva esfuerzo-deformación ingenieril se relaciona con la definición del esfuerzo ingenieril. En los cálculos, se usó el área original A_0 , pero eso no es exacto, porque el área cambia en forma continua. Se definirán el **esfuerzo real** y la **deformación real** con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Esfuerzo real} = \sigma_r = \frac{F}{A} \quad (6-11)$$

$$\text{Deformación unitaria real} = \int \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right), \quad (6-12)$$

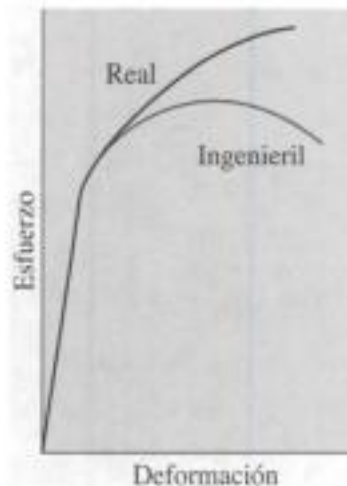


Figura 6-17 Relación entre los diagramas de esfuerzo real-deformación unitaria real y esfuerzo ingenieril-deformación ingenieril. Las curvas son idénticas hasta el punto de cedencia.

donde A es el área real a la que se aplica la fuerza F . La expresión $\ln(A_0/A)$ sólo se puede usar antes de comenzar la formación de cuello, cuando el volumen permanece constante y $\frac{A_0}{l_0} = \frac{A}{l}$.

En la figura 6-17 se comparan las curvas de esfuerzo-deformación reales y esfuerzo-deformación ingenieriles. El esfuerzo real continúa aumentando después de la formación de cuello porque, aunque la carga necesaria disminuye, el área disminuye aún más.

Para aplicaciones estructurales, con frecuencia no se requieren esfuerzos ni deformaciones reales. Cuando se rebasa la resistencia de cedencia, el material se deforma. El componente falló porque ya no tiene la forma que se pretendía al principio. Además, se desarrolla una diferencia apreciable entre las dos curvas sólo cuando comienza la formación de cuello. Pero, cuando eso sucede, el componente ya está muy deformado y ya no sirve para el uso que se pretende. Los ingenieros que trabajan con el procesamiento de materiales necesitan los datos acerca del esfuerzo y la deformación reales.

EJEMPLO 6-5 Cálculo del esfuerzo real y de la deformación real

Compare el esfuerzo y la deformación ingenieriles con el esfuerzo y la deformación reales para la aleación de aluminio del ejemplo 6-1 (a) a la carga máxima y (b) a la fractura. El diámetro con la carga máxima es 0.497 pulg, y en la fractura es 0.398 pulg.

SOLUCIÓN

a) A la carga máxima:

$$\text{Esfuerzo ingenieril} = \frac{F}{A_0} = \frac{8000 \text{ lb}}{(\pi/4) (0.505 \text{ pulg})^2} = 40\,000 \text{ psi}$$

$$\text{Esfuerzo real} = \frac{F}{A} = \frac{8000}{(\pi/4) (0.497)^2} = 41\,237 \text{ psi}$$

$$\text{Deformación ingenieril} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{2.120 - 2.000}{2.000} = 0.060 \text{ pulg/pulg}$$

$$\text{Deformación real} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln\left(\frac{2.120}{2.000}\right) = 0.058 \text{ pulg/pulg}$$

b) En la fractura:

$$\text{Esfuerzo ingenieril} = \frac{F}{A_0} = \frac{7600 \text{ lb}}{(\pi/4) (0.0505 \text{ pulg})^2} = 38\,000 \text{ psi}$$

$$\text{Esfuerzo real} = \frac{F}{A} = \frac{7600}{(\pi/4) (0.398)^2} = 61\,090 \text{ psi}$$

$$\text{Deformación ingenieril} = \frac{\Delta l}{l_0} = \left(\frac{0.205}{2.000} \right) = 0.1025 \text{ pulg/pulg}$$

$$\begin{aligned} \text{Deformación real} &= \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) = \ln\left[\frac{(\pi/4)(0.505)^2}{(\pi/4)(0.398)^2}\right] \\ &= \ln(1.610) = 0.476 \text{ pulg/pulg} \end{aligned}$$

El esfuerzo real es mucho mayor que el ingenieril sólo después de que comienza la formación de cuello.

6-6

El ensayo de flexión para materiales frágiles

En los materiales dúctiles, la curva esfuerzo-deformación ingenieril suele pasar por un máximo; este esfuerzo máximo es la resistencia del material a la tensión. La falla se presenta a un esfuerzo menor, después de que la formación de cuello ha reducido el área transversal que sostiene la carga. En los materiales más frágiles, la falla se presenta en la carga máxima, cuando la resistencia a la tensión y la resistencia a la ruptura son iguales. En los materiales frágiles, incluidos muchos cerámicos, la resistencia de cedencia, la resistencia a la tensión y la resistencia a la ruptura son iguales (Fig. 6-18).

En muchos materiales frágiles no se puede hacer con facilidad el ensayo de tensión convencional, a causa de la presencia de imperfecciones en la superficie. Con frecuencia, sólo con poner un material frágil en las mordazas de la máquina de ensayos de tensión, se produce la fractura. Esos materiales se pueden probar con el **ensayo de flexión** [Fig. 6-19(a)]. Si se aplica la carga en tres puntos y se provoca la flexión, se produce un esfuerzo de tensión en el material



Figura 6-18 Comparación del comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales frágiles comparado con el de los materiales dúctiles.

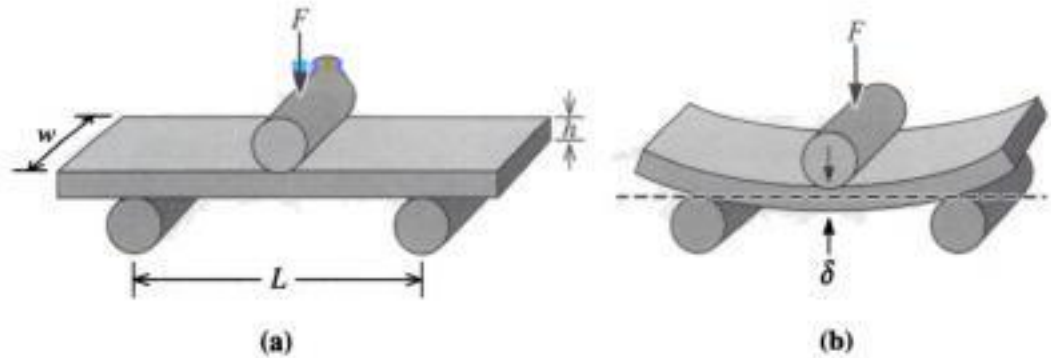


Figura 6-19 (a) Para medir la resistencia de materiales frágiles, se usa con frecuencia el ensayo de flexión y (b) la deflexión δ obtenida por flexión.

en un punto opuesto al punto de aplicación de la fuerza central. La fractura comienza en ese punto. La **resistencia a la flexión**, o **módulo de ruptura**, describe la resistencia del material:

$$\text{Resistencia a la flexión en el ensayo de flexión con tres puntos} = \frac{3FL}{2wh^2} = \sigma_{\text{flexión}} \quad (6-13)$$

donde F es la carga de fractura o de ruptura, L es la distancia entre los dos puntos de apoyo, w es el ancho del espécimen y h es la altura del espécimen. Las unidades de la resistencia a la flexión son unidades de esfuerzo, y esa resistencia se representa con $\sigma_{\text{flexión}}$. Los resultados del ensayo de flexión son parecidos a las curvas de esfuerzo-deformación; sin embargo, se grafica el esfuerzo en función de la deflexión y no en función de la deformación unitaria (Fig. 6-20).

El módulo de elasticidad en flexión, o **módulo de flexión** ($E_{\text{flexión}}$), se calcula en la región elástica de la figura 6-20:

$$\text{Módulo de flexión} = \frac{L^3 F}{4wh^3 \delta} = E_{\text{flexión}} \quad (6-14)$$

donde δ es la deflexión o flecha de la viga cuando se aplica la fuerza F .

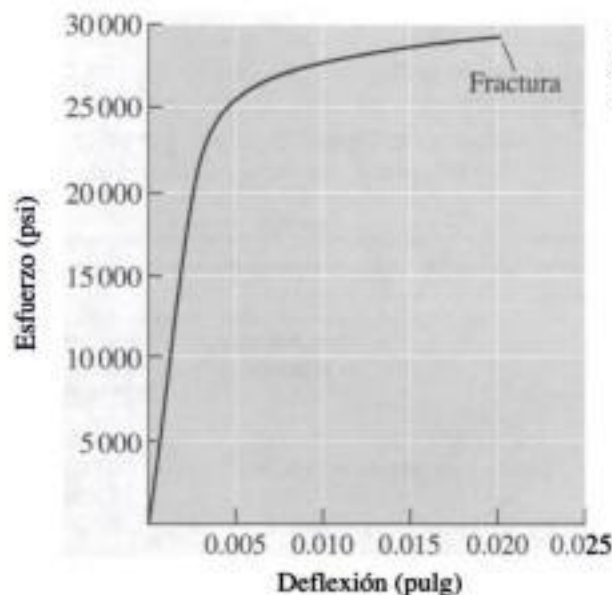


Figura 6-20 Curva de esfuerzo-deflexión para MgO, obtenida en un ensayo de flexión.

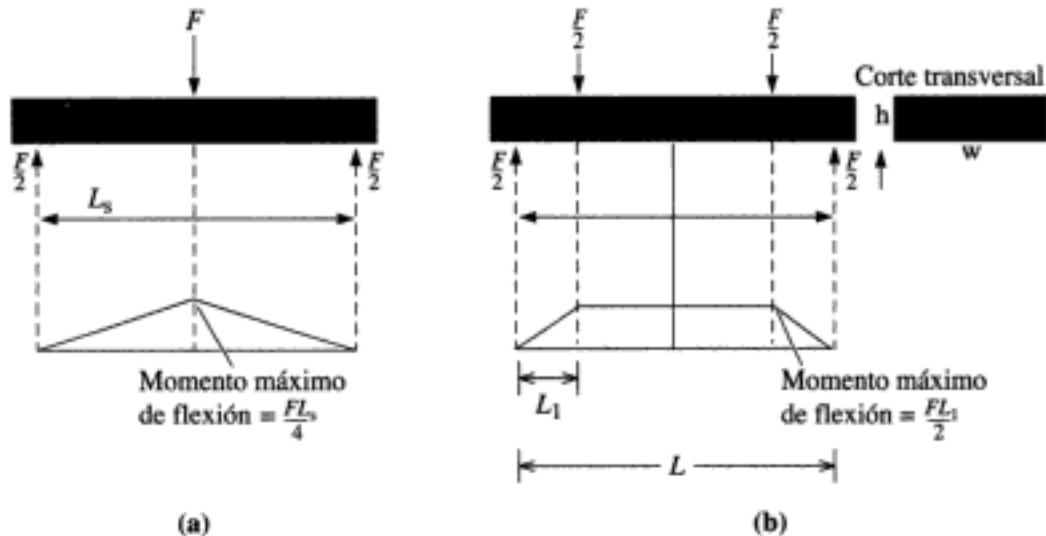


Figura 6-21 (a) Esquema de ensayo de flexión en tres puntos y (b) en cuatro puntos.

Este ensayo también se puede ejecutar en una configuración llamada ensayo de flexión en cuatro puntos (Fig. 6-21). El esfuerzo máximo o esfuerzo de flexión para un ensayo de flexión con cuatro puntos es:

$$\sigma_{\text{flexión}} = \frac{3FL_1}{4wh^2} \quad (6-15)$$

Obsérvese que al deducir las ecuaciones 6-13 a 6-15 se supuso una respuesta lineal esfuerzo-deformación unitaria (esto no se puede hacer en forma correcta con muchos polímeros). El ensayo de flexión con cuatro puntos se presta mejor para materiales que contienen imperfecciones. Esto se debe a que el momento de flexión entre las platinas interiores es constante (Fig. 6-21(b)), y entonces las muestras tienden a romperse en un lugar al azar, a menos que haya una imperfección que cause concentración del esfuerzo.

Ya que las grietas e imperfecciones tienden a permanecer cerradas durante la compresión, los materiales frágiles, como el concreto, se diseñan con frecuencia de tal modo que sobre la parte sólo actúen esfuerzos de compresión. Muchas veces se encuentra que los materiales frágiles fallan cuando los esfuerzos de compresión son mucho mayores que los de tensión (tabla 6-4). Ésta es la causa de que sea posible sostener un camión de bomberos sobre cuatro tazas de café. Sin embargo, los cerámicos tienen una tenacidad mecánica muy limitada; por eso, cuando se deja caer una taza de café, puede romperse con facilidad.

TABLA 6-4 ■ Comparación de las resistencias de algunos materiales cerámicos y compuestos a la tensión, compresión y flexión

Material	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia a la compresión (psi)	Resistencia a la flexión (psi)
Poliéster con 50% de fibra de vidrio	23 000	32 000	45 000
Poliéster con 50% de tela de fibra de vidrio	37 000	27 000*	46 000
Al ₂ O ₃ (99% puro)	30 000	375 000	50 000
SiC (sinterizado sin presión)	25 000	560 000	80 000

*Varios materiales compuestos son muy malos en compresión.

EJEMPLO 6-6**Resistencia de materiales compuestos a la flexión**

La resistencia a la tensión de un material compuesto reforzado con fibras de vidrio es 45 000 psi, y el módulo de flexión es 18×10^6 psi. Una muestra tiene 0.5 pulg de ancho, 0.375 pulg de alto, 8 pulg de longitud y se sostiene entre dos varillas a 5 pulg de distancia. Calcule la fuerza necesaria para romper el material y la deflexión de la muestra en la fractura, suponiendo que no se produce deformación plástica.

SOLUCIÓN

Con base en la descripción de la muestra, $w = 0.5$ pulg, $h = 0.375$ pulg y $L = 5$ pulg. De acuerdo con la ecuación 6-15:

$$45\,000 \text{ psi} = \frac{3FL}{2wh^2} = \frac{(3)(F \text{ lb})(5 \text{ pulg})}{(2)(0.5 \text{ pulg})(0.375 \text{ pulg})^2} = 106.7F$$

$$F = \frac{45\,000}{106.7} = 422 \text{ lb}$$

En consecuencia, la deflexión, de acuerdo con la ecuación 6-14, es:

$$18 \times 10^6 \text{ psi} = \frac{L^3 F}{4wh^3 \delta} = \frac{(5 \text{ pulg})^3 (422 \text{ lb})}{(4)(0.5 \text{ pulg})(0.375 \text{ pulg})^3 \delta}$$

$$\delta = 0.0278 \text{ pulg}$$

En este cálculo supusimos que no hay comportamiento viscoelástico, y que el comportamiento de esfuerzo en función de la deformación unitaria es lineal.[8]

6-7**Dureza de los materiales**

El **ensayo de dureza** mide la resistencia de la superficie de un material a la penetración de un objeto duro. Dureza es un término que no se define con precisión. Dependiendo del contexto, puede representar resistencia al rayado o penetración y una medida cualitativa de la resistencia del material. En la figura 6-22 se muestra un durómetro Rockwell. En general, en las mediciones de **macro dureza**, la carga aplicada es ~ 2 N. Se han inventado varios ensayos de dureza, pero las que se usan con más frecuencia son el ensayo de Rockwell y el de Brinell. En esos ensayos, se usan distintos penetradores, los cuales se muestran en la figura 6-23.

En el ensayo de *dureza Brinell*, se comprime una esfera de acero duro, por lo general de 10 mm de diámetro, contra la superficie del material. Se mide el diámetro de la impresión, que suele ser de 2 a 6 mm, y se calcula el número de dureza Brinell (que se abrevia HB o BHN, por sus siglas en inglés) con la siguiente ecuación:

$$HB = \frac{2F}{(\pi D [D - \sqrt{D^2 - D_i^2}])} \quad (6-16)$$

donde F es la carga aplicada en kilogramos, D es el diámetro del penetrador en milímetros y D_i es el diámetro de la impresión en milímetros. La dureza Brinell tiene las unidades de esfuerzo (es decir, kg/mm^2).



Figura 6-22 Durómetro Rockwell. (Cortesía de Newage Testing Instruments, Inc.)



Figura 6-23 Penetradores para los ensayos de dureza Brinell y Rockwell.

El ensayo de dureza *Rockwell* usa una bola de acero de pequeño diámetro, para materiales blandos, y un cono o indentador de diamante, para los materiales más duros. La máquina de ensayo mide en forma automática la profundidad de penetración del indentador, la cual se convierte en un número de dureza Rockwell (HR, por sus siglas en inglés). Como no se necesita una medición óptica de las dimensiones de la penetración, el ensayo de Rockwell tiende a ser más frecuente que el ensayo de Brinell. Se usan algunas variaciones del ensayo de Rockwell, incluidas las que se describen en la tabla 6-5. Para los aceros duros, se usa el ensayo de Rockwell C (HRC), mientras que para el aluminio se podría seleccionar uno como el Rockwell F (HRF). Los ensayos de Rockwell dan como resultado un número que no tiene unidades.

TABLA 6-5 ■ Comparación de pruebas normales de dureza

Prueba	Penetrador	Carga	Aplicación
Brinell	Esfera con 10 mm	3000 kg	Hierro colado y acero
Brinell	Esfera con 10 mm	500 kg	Aleaciones no ferrosas
Rockwell A	Cono	60 kg	Materiales muy duros
Rockwell B	Esfera de 1/16 pulg	100 kg	Latón, acero de baja resistencia
Rockwell C	Cono	150 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell D	Cono	100 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell E	Esfera de 1/8 pulg	100 kg	Materiales muy blandos
Rockwell F	Esfera de 1/16 pulg	60 kg	Aluminio, materiales suaves
Vickers	Pirámide de diamante	10 kg	Todos los materiales
Knoop	Pirámide de diamante	500 g	Todos los materiales

Los números de dureza se usan principalmente como base *cualitativa* de comparación entre materiales o en especificaciones para tratamiento térmico en la manufactura o control de calidad y para correlacionar con otras propiedades de materiales; por ejemplo, la dureza Brinell se relaciona estrechamente con la resistencia a la tensión del acero, con la ecuación:

$$\text{Resistencia a la tensión (psi)} = 500 \text{ HB} \quad (6-17)$$

donde HB tiene las unidades de kg/mm^2 .

Se puede obtener un número de dureza Brinell sólo en pocos minutos, casi sin preparar el espécimen y sin romper el componente; es decir, se considera que es un ensayo no destructivo; proporciona una aproximación muy cercana a la resistencia a la tensión. El número de dureza Rockwell no se puede relacionar en forma directa con la resistencia de cedencia en los metales y aleaciones; sin embargo, el ensayo es rápido, se hace con facilidad y es frecuente en la industria.[9]

La dureza se correlaciona bien con la resistencia al desgaste. (Para medir la resistencia al desgaste hay, además, un ensayo especial.) Un material que se use para romper o moler minerales debe ser muy duro, para asegurar que no se desgaste o erosione con esos minerales. De igual modo, los dientes de los engranajes en el sistema de transmisión o motriz de un vehículo debe tener la dureza suficiente para que no se gasten los dientes. Comúnmente, encontramos que los materiales poliméricos son excepcionalmente blandos, los metales y las aleaciones tienen durezas intermedias, y los cerámicos son excepcionalmente duros. Se usan materiales, como el compuesto de carburo de tungsteno y cobalto (WC-Co), llamado "carburo", en aplicaciones para herramientas de corte. También se usan materiales como diamante microcristalino o carbono semejante al diamante (DLC, por sus siglas en inglés) en las herramientas de corte y en otras aplicaciones.

El ensayo de Knoop (HK) es un **ensayo de microdureza** que genera "indentaciones" tan pequeñas que se requiere un microscopio para obtener la medida. En esos ensayos la carga



Figura 6-24 Fotografía de un nanopenetrador: el Hysitron TribolIndenter®. (Cortesía de Hysitron Incorporated.)

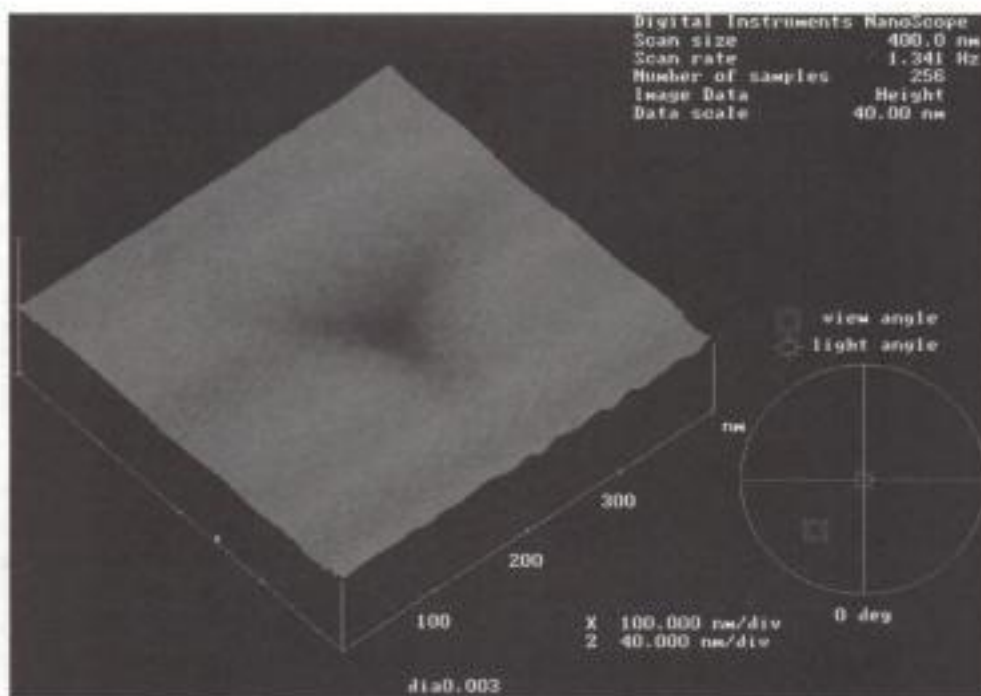


Figura 6-25 Nanopenetración de película de carbono tipo diamante, a nanoescala. (Cortesía del Dr. Scott Mao, Universidad de Pittsburgh.)

aplicada es menor que 2 N.[10] El ensayo Vickers, que usa un indentador de diamante en forma de pirámide, se puede hacer como ensayo de macro o de microdureza. Los ensayos de macrodureza son adecuados para materiales con una dureza superficial mayor que en el núcleo, materiales que en distintas áreas tengan distintos valores de dureza o en muestras que no sean macroscópicamente planas.

En el capítulo 2 describimos los materiales y dispositivos nanoestructurados. Para algunas de las aplicaciones de nanotecnología, son importantes las mediciones de dureza en nanoescala, o de **nanodureza**. Las técnicas para medir la dureza a escalas de longitud muy pequeñas se han vuelto importantes en muchas aplicaciones, para las cuales se usa un nanoindentador (Fig. 6-24). La carga aplicada en este ensayo es del orden de 100 μN . Esta técnica implica crear una indentación en nanoescala sobre la superficie del material que se ensaya (Fig. 6-25). Con base en la carga aplicada y en las dimensiones de la penetración producida, se puede determinar la dureza a nanoescala de un material. Se ha aplicado exitosamente esta técnica para determinar la nanodureza en recubrimientos de carbono semejante al diamante (DLC, por sus siglas en inglés), depositados sobre discos duros magnéticos. En la actualidad, los ensayos de micro y nanodureza se usan principalmente en investigación y desarrollo.

6-8

Efectos de la velocidad de deformación y comportamiento al impacto

Cuando un material se sujeta a un golpe repentino y violento, en el que la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$ o $\dot{\epsilon}$) es extremadamente rápida, se puede comportar en una forma mucho más frágil que la que se observa en el ensayo de tensión. Eso, por ejemplo, se puede observar en muchos plásticos y en materiales como la masilla Silly Putty®. Si se estira un plástico, polietileno o Silly Putty®, con mucha lentitud, las moléculas de polímero tienen tiempo de desenredarse o las cadenas de deslizarse entre sí y permitir deformaciones plásticas grandes.

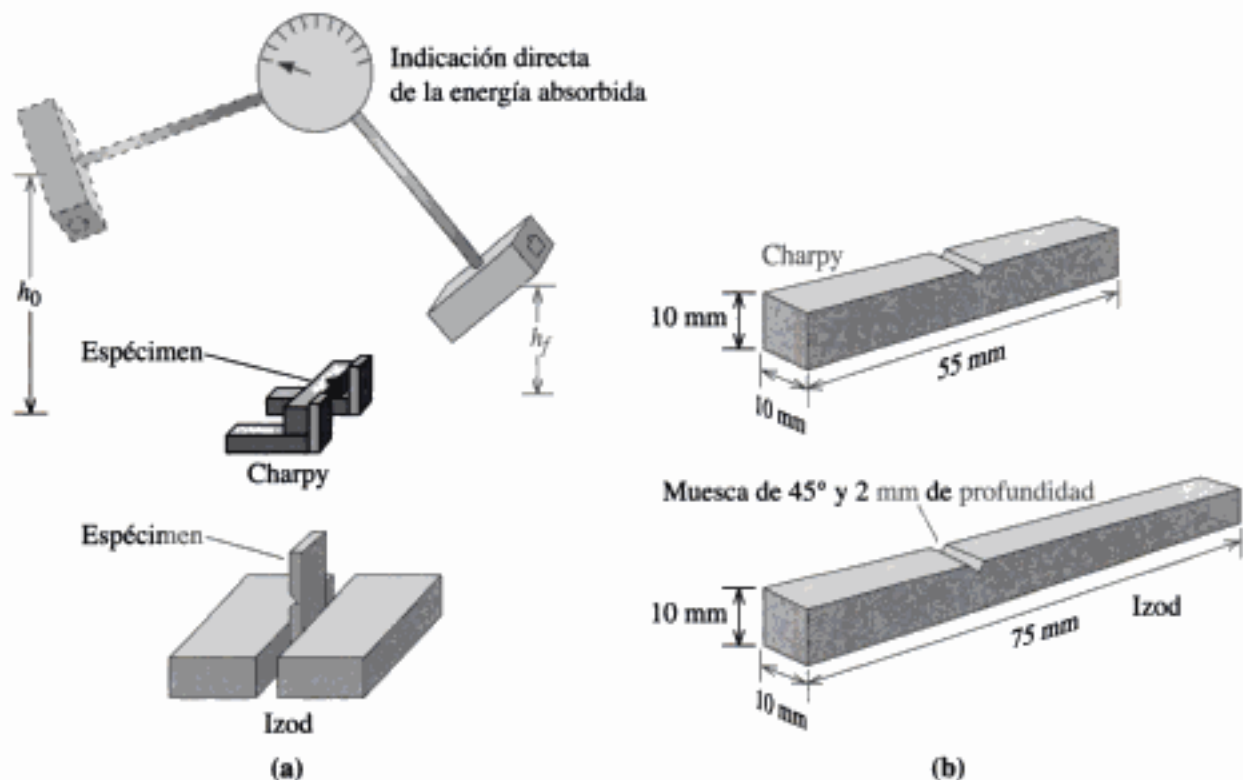


Figura 6-26 El ensayo de impacto: (a) Ensayos de Charpy e Izod y (b) Dimensiones de especímenes normales.

Sin embargo, si se aplica una carga de impacto, el tiempo es insuficiente para que esos mecanismos jueguen un papel en el proceso de deformación, y los materiales se rompen en forma frágil. Con frecuencia se usa un **ensayo de impacto** para evaluar la fragilidad de un material bajo estas condiciones. En contraste con el ensayo de tensión, en el de impacto las tasas de deformación unitaria son mucho mayores ($\dot{\epsilon} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$).

Se han inventado muchos procedimientos de prueba, incluyendo el ensayo de *Charpy* y el ensayo de *Izod* (Fig. 6-26). El ensayo de Izod se usa frecuentemente en materiales plásticos. El espécimen de ensayo puede o no tener muesca; los especímenes con muesca en V son mejores para medir la resistencia del material a la propagación de grietas.

En el ensayo hay un péndulo pesado que comienza a moverse a una altura h_0 , describe su arco, golpea y rompe el espécimen, y llega a una altura final h_f menor. Si se conocen las alturas inicial y final del péndulo se puede calcular la diferencia en energía potencial. Esta diferencia es la **energía de impacto** que absorbió el espécimen cuando falló. Para el ensayo de Charpy, la energía se suele expresar en joules (J) o en libra-pie (lb·pie); $1 \text{ lb} \cdot \text{pie} = 1.356 \text{ J}$. Los resultados del ensayo de Izod se expresan en J/m o en lb·pie/pulg. La capacidad de un material para resistir el impacto de un golpe se suele llamar **tenacidad al impacto** del material. Como se dijo antes, en algunos casos se considera que el área bajo la curva de esfuerzo-deformación real o ingenieril es una medida de la **tenacidad a la tensión**. En ambos casos, se mide la energía necesaria para romper un material. La diferencia es que en los ensayos de tensión las velocidades de deformación son mucho menores en comparación con las que se usan en un ensayo de impacto. Otra diferencia es que en un ensayo de impacto se manejan en general materiales que tienen una muesca. La **tenacidad a la fractura** de un material se define como la capacidad del mismo para resistir una carga aplicada, cuando el material contiene imperfecciones. En la sección 6-10 se describirá la tenacidad a la fractura.

6-9 Propiedades que se obtienen en el ensayo de impacto

En la figura 6-27 se observa una curva que muestra las tendencias en los resultados de una serie de ensayos de impacto efectuadas en nylon a distintas temperaturas. En la práctica, los ensayos se hacen a una cantidad limitada de temperaturas.

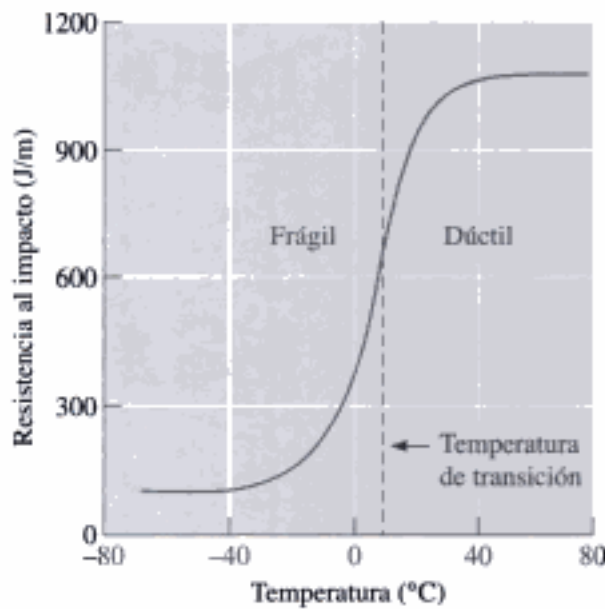


Figura 6-27
Resultados de una serie de ensayos de impacto para un polímero termoplástico de nylon supertenaz.

Temperatura de transición de dúctil a frágil (DBTT, por sus siglas en inglés) La **temperatura de transición de dúctil a frágil** es aquella a la cual el modo de fractura en un material cambia de dúctil a frágil. Se puede definir esta temperatura mediante la energía promedio entre las regiones dúctil y frágil, o a cierta energía específica absorbida, o mediante la aparición de alguna fractura característica. Un material que se somete a un golpe de impacto en servicio debe tener una temperatura de transición *menor* que la de su entorno.

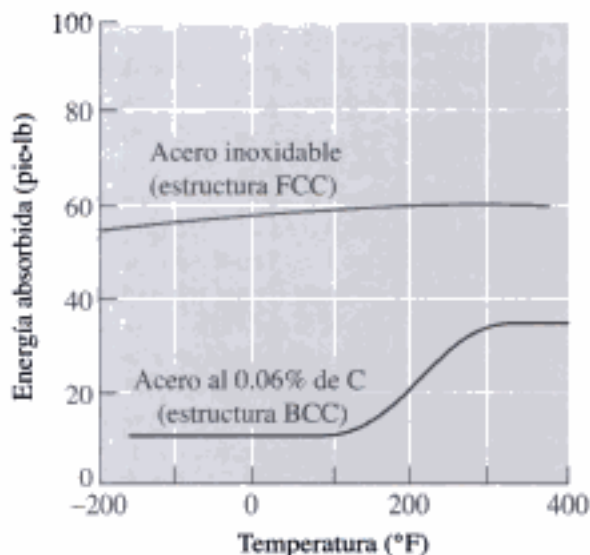


Figura 6-28
Propiedades de muesca en V de Charpy para un acero al carbono BCC y un acero inoxidable FCC. La estructura cristalina FCC normalmente conduce a mayores energías absorbidas, sin mostrar temperatura de transición.

No todos los materiales tienen una temperatura de transición definida (Fig. 6-28). Los metales BCC tienen temperaturas de transición, pero la mayoría de los metales FCC no la tienen. Estos metales tienen grandes energías absorbidas que decrecen en forma gradual y a veces incluso aumentan, a medida que la temperatura disminuye. Como se mencionó antes, puede ser que esta transición haya contribuido a la falla del *Titanic*.

La temperatura de transición de dúctil a frágil se relaciona estrechamente con la temperatura de transición vítrea en los polímeros y, para fines prácticos, se maneja de la misma manera. Como se mencionó antes, la menor temperatura de transición de los polímeros que se usaron en los sellos "O" del cohete de impulsión, así como otros factores, causaron el desastre del *Challenger*.

Sensibilidad a la muesca Las muescas originadas por un maquinado o fabricación deficiente, o las ya diseñadas, concentran esfuerzos y reducen la tenacidad de los materiales. La **sensibilidad a la muesca** de un material se puede evaluar comparando las energías absorbidas de especímenes con y sin muesca. Las energías absorbidas son mucho menores en los especímenes con muesca, si el material es sensible a la muesca. En la sección 6-15 se describirá cómo la presencia de muescas afecta el comportamiento de los materiales sometidos a esfuerzos cíclicos.

Relación con el diagrama esfuerzo-deformación La energía necesaria para romper un material durante un ensayo de impacto, es decir, la tenacidad al impacto, no siempre se relaciona con la tenacidad a la tensión (es decir, el área contenida dentro del diagrama esfuerzo-deformación reales, figura 6-29). Como se dijo antes, con frecuencia los ingenieros consideran que el área bajo la curva esfuerzo-deformación ingenieril es la tenacidad a la tensión. En general, los metales que tienen alta resistencia y a la vez gran ductilidad, tienen buena tenacidad a la tensión. Sin embargo, no siempre es así cuando las velocidades de deformación son altas. Por ejemplo, los metales que muestran una excelente tenacidad a la tensión pueden presentar comportamiento frágil cuando están sujetos a velocidades de deformación altas; es decir, pueden mostrar pobre tenacidad al impacto. De esta forma, la velocidad de deformación puede desplazar la transición de dúctil a frágil (DBTT). Los cerámicos y muchos materiales compuestos tienen, normalmente, mala tenacidad, aunque alta resistencia, debido a que virtualmente no tienen ductilidad. Esos materiales muestran tanto tenacidad a la tensión como al impacto deficientes.

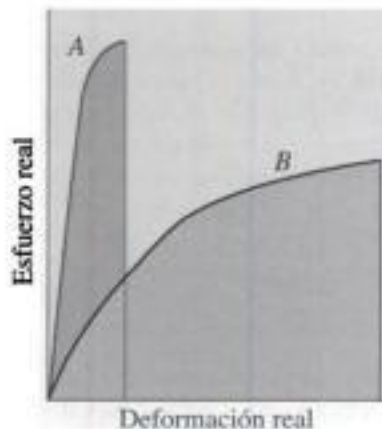


Figura 6-29 El área contenida por la curva de esfuerzo real-deformación real se relaciona con la tenacidad a la tensión. Aunque el material B tiene menor resistencia de cedencia, absorbe mayor cantidad de energía que el material A. Las energías obtenidas con estas curvas pueden ser distintas a las obtenidas con datos de ensayos de impacto.

Uso de las propiedades de impacto La energía absorbida y la temperatura de transición de dúctil a frágil son muy sensibles a las condiciones de carga. Por ejemplo, la mayor rapidez de aplicación de energía al espécimen reduce la energía absorbida y aumenta la temperatura de transición de dúctil a frágil. El tamaño del espécimen también afecta los resultados, porque es más difícil que un material grueso se deforme; por consiguiente, se necesitan energías menores para romper materiales gruesos. Por último, la configuración de la muesca afecta el comportamiento: una grieta superficial en punta y aguda permite menores energías absorbidas que una muesca en V. Ya que con frecuencia no se pueden predecir o controlar todas esas condiciones, el ensayo de impacto es una forma rápida, cómoda y poco costosa de comparar diversos materiales.

EJEMPLO 6-7**Diseño de un marro**

Diseñe un marro de ocho libras para clavar postes de cerca en el suelo.

SOLUCIÓN

Primero se deben tener en cuenta los requisitos de diseño que debe cumplir el marro. Una lista parcial sería:

1. El mango debe ser ligero, pero suficientemente tenaz para que no se rompa en forma catastrófica.
2. La cabeza no se debe romper y desportillar durante su uso, aun a temperaturas inferiores a cero.
3. La cabeza no debe deformarse durante el uso continuo.
4. La boca debe ser suficientemente grande para asegurar que no falle la puntería al poste, y no debe tener muescas agudas que pudieran causar desportillamiento.
5. El marro no debe ser costoso.

Aunque el mango podría ser de un material compuesto, tenaz y ligero, por ejemplo, de un polímero reforzado con fibras de Kevlar (que es otro polímero especial), un mango de madera de unas 30 pulgadas de longitud sería mucho menos costoso y seguiría teniendo la tenacidad suficiente. Como se ve en un capítulo posterior, se puede considerar que la madera es un material compuesto natural, reforzado con fibras.

Para producir la cabeza se prefiere un material que tenga baja temperatura de transición, que pueda absorber una energía relativamente grande durante el impacto y que, no obstante, también tenga la suficiente dureza para evitar su deformación. El requisito de tenacidad haría desechar la mayoría de las cerámicas. Un metal cúbico centrado en las caras, como por ejemplo, acero inoxidable FCC o cobre, podría dar mejor tenacidad, aun a bajas temperaturas; sin embargo, esos metales son relativamente blandos y costosos. Una elección adecuada sería un acero BCC normal. Los aceros ordinarios son poco costosos, tienen buena dureza y resistencia, y algunos tienen suficiente tenacidad a bajas temperaturas.

En el apéndice A se ve que la densidad del hierro es 7.87 g/cm^3 , es decir 0.28 lb/pulg^3 . Supondremos que la densidad del acero es más o menos igual. El volumen de acero necesario es $V = 8 \text{ lbs}/(0.28 \text{ lb/pulg}^3) = 28.6 \text{ pulg}^3$. Para asegurar que se golpee lo que se desea, la cabeza debe tener una forma cilíndrica, con 2.5 pulgadas de diámetro en la boca. La longitud de la cabeza sería entonces de 5.8 pulgadas.

6-10**Mecánica de la fractura**

La **mecánica de la fractura** es la disciplina que se ocupa del comportamiento de los materiales que contienen grietas u otras imperfecciones. El término "imperfección" se refiere a pequeños poros (agujeros), inclusiones o microgrietas. El término "imperfección" *no* indica defectos a nivel atómico, como vacancias o dislocaciones. Lo que se desea conocer es el esfuerzo máximo que puede resistir un material, si contiene imperfecciones de cierto tamaño y geometría. La tenacidad a la fractura mide la capacidad de un material que contiene una imperfección para resistir una carga aplicada. Obsérvese que para esto *no* se requiere una alta velocidad de deformación (impacto).

Un ensayo normal de tenacidad a la fractura se puede hacer aplicando un esfuerzo de tensión a un espécimen preparado con una imperfección de tamaño y geometría conocidos (Fig. 6-30). El esfuerzo aplicado al material se intensifica en la imperfección, que funciona como *concentrador de esfuerzo*. Para un caso sencillo, el *factor de intensidad de esfuerzo*, K , es

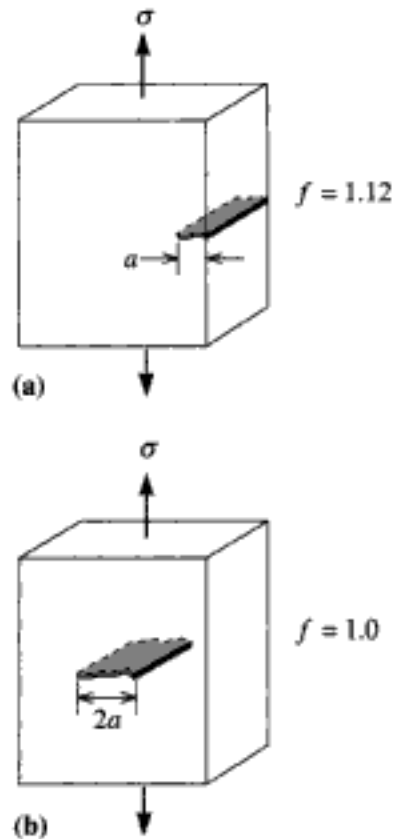


Figura 6-30 Esquema de especímenes de tenacidad a la fractura, con imperfecciones o grietas (a) laterales y (b) internas.

$$K = f\sigma\sqrt{\pi a}, \quad (6-18)$$

en donde f es un factor geométrico para el espécimen y la imperfección, σ es el esfuerzo aplicado y a es el tamaño de la imperfección [que se define en la Fig. 6-30(b)]. Obsérvese que la ecuación analítica de K cambia con la geometría de la imperfección y del espécimen. Si se supone que el espécimen tiene un ancho "infinito", entonces $f \approx 1.0$. Para una muesca superficial pequeña con un solo borde [Fig. 6-30(a)], $f = 1.12$.

Si se hace un ensayo en un espécimen con un tamaño conocido de imperfección, se puede determinar el valor de K que causa el crecimiento de la imperfección y lleva a la falla. Este factor crítico de intensidad de esfuerzo se define como *tenacidad a la fractura*, K_c .

$$K_c = K \text{ necesaria para propagar una grieta} \quad (6-19)$$

La tenacidad a la fractura depende del espesor de la muestra. Al aumentar el grosor, la tenacidad a la fractura K_c disminuye hasta un valor constante (Fig. 6-31). Esta constante se llama *tenacidad a la fractura en deformación en plana*, K_{Ic} . Lo que se suele mencionar como propiedad de un material es K_{Ic} . En la tabla 6-6 se compara el valor de K_{Ic} con la resistencia de varios materiales a la cedencia. Las unidades de la tenacidad a la fractura son $\text{ksi}\sqrt{\text{pulg}} = 1.0989 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ($\text{ksi} = \text{miles de lb/pulg}^2$).

La capacidad de un material para resistir el crecimiento de una grieta depende de una gran cantidad de factores:

1. Imperfecciones más grandes reducen el esfuerzo admisible. Las técnicas especiales de manufactura, como el filtrado de las impurezas de los metales líquidos y el prensado en caliente o el prensado isostático en caliente de polvos para producir componentes cerámicos o de superaleaciones reducen el tamaño de las imperfecciones y mejoran la tenacidad a la fractura (capítulos 8 y 14).

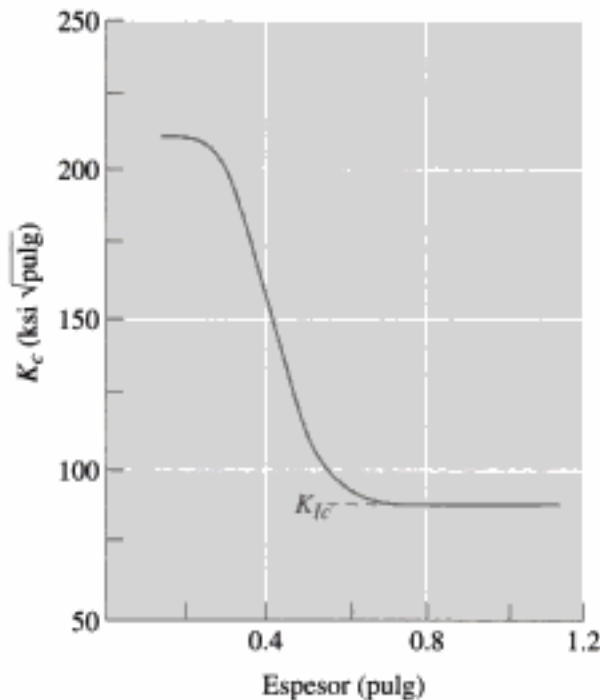


Figura 6-31 La tenacidad a la fractura, K_{Ic} de un acero con resistencia de 30 000 psi a la cedencia disminuye al aumentar el espesor y llega a nivelarse en la tenacidad a la fractura en deformación plana, K_{Ic} .

2. La capacidad de un material para deformarse es determinante. En los metales dúctiles, el material cercano a la punta de la imperfección se puede deformar, haciendo que la punta de cualquier grieta se redondee y se reduzca el factor de intensidad de esfuerzo, evitando así el crecimiento de la grieta. Al aumentar la resistencia de un metal dado se suele disminuir la ductilidad y producirse una menor tenacidad a la fractura. (Véase la tabla 6-6.) Los materiales frágiles, como los cerámicos y muchos polímeros, tienen tenacidades a la fractura mucho menores que las de los metales.

3. Piezas más gruesas y rígidas de un material dado tienen menor tenacidad a la fractura que los materiales delgados.

4. Al aumentar la rapidez de aplicación de la carga, como en un ensayo de impacto, se suele reducir la tenacidad a la fractura del material.

TABLA 6-6 ■ Tenacidad a la fractura en deformación plana, K_{Ic} , de algunos materiales

Material	Tenacidad a la fractura K_{Ic} (psi $\sqrt{\text{pulg}}$)	Resistencia de cedencia o resistencia última (para sólidos frágiles) (psi)
Aleación Al-Cu	22 000	66 000
	33 000	47 000
Ti - 6% Al - 4% V	50 000	130 000
	90 000	125 000
Acero al Ni-Cr	45 800	238 000
	80 000	206 000
Al_2O_3	1 600	30 000
Si_3N_4	4 500	80 000
ZrO_2 fortalecida por transformación	10 000	60 000
Compuesto de Si_3N_4 -SiC	51 000	120 000
Polimetil metacrilato, PMMA	900	4 000
Polycarbonato, PC	3 000	8 400

5. Al aumentar la temperatura aumenta normalmente la tenacidad a la fractura, igual que en el ensayo de impacto.

6. Un tamaño de grano pequeño mejora, normalmente, la tenacidad a la fractura, mientras que si hay más defectos puntuales y dislocaciones se reduce la tenacidad a la fractura. Así, un material cerámico de grano fino puede dar mejor resistencia al crecimiento de las grietas.

7. En ciertos materiales cerámicos, también se pueden aprovechar las transformaciones inducidas por esfuerzos, que a su vez producen esfuerzos de compresión para tener mayor tenacidad a la fractura.

El ensayo de fractura en los cerámicos no se puede hacer con facilidad usando una muesca aguda, porque la formación de esa muesca causa con frecuencia la ruptura de las muestras. Se puede hacer el ensayo de dureza para tener una medida de la tenacidad a la fractura en muchos cerámicos. Cuando se penetra un material cerámico, los esfuerzos de tensión generan grietas secundarias que se forman en la penetración, y la longitud de las grietas secundarias ($2d$) proporciona una medida de la tenacidad del material cerámico. En algunos casos, una penetración formada con un medidor de dureza se usa como grieta inicial en el ensayo de flexión. El valor de K_{Ic} se relaciona con la dureza (H), el módulo de Young (E) y las dimensiones de la grieta mediante la siguiente ecuación:

$$K_{Ic} = \alpha_0 \left(\frac{E}{H} \right)^{1/2} \left(\frac{P}{d^{3/2}} \right) \quad (6-20)$$

En esta ecuación, P es la carga de penetración, en N; $2d$ es la longitud de la grieta secundaria en metros; $\alpha_0 = 0.016$, un parámetro geométrico. También en esta ecuación, H y E tienen unidades de N/m^2 . La carga, si está en kgf, se debe convertir a N ($1 \text{ kgf} = 1.02 \text{ N}$). El valor resultante de tenacidad está en $N/m^{3/2}$ o $Pa \cdot m^{1/2}$. La figura 6.32 muestra la geometría de esta ecuación. La figura 6.33 muestra la penetración y las grietas secundarias en una muestra de alúmina.

En general, este método de medición directa se presta mejor para comparaciones y no para mediciones absolutas de valores de tenacidad a la fractura. En la figura 6-34 se muestra la tenacidad a la fractura de muchos materiales diseñados.

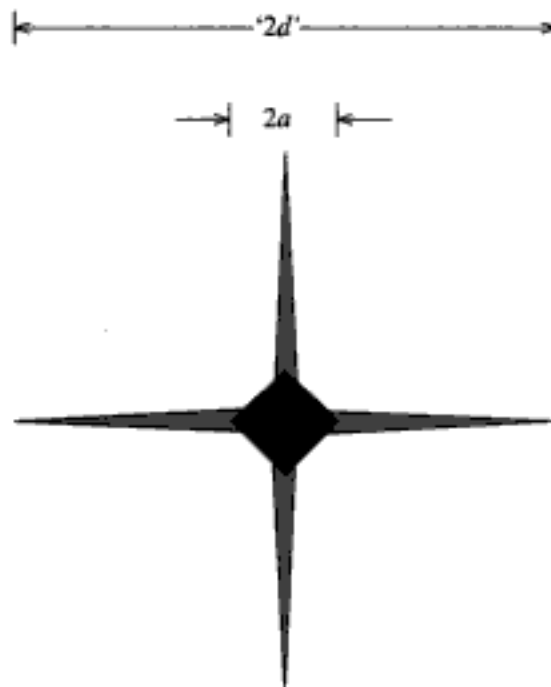


Figura 6-32 Grietas secundarias formadas durante el ensayo de dureza; se pueden usar para evaluar la tenacidad a la fractura de materiales frágiles. Aquí se observa un esquema de esas grietas secundarias que parten de un penetrador de pirámide de diamante (como los del ensayo de dureza Vickers). La longitud de la penetración es $2a$. Las grietas secundarias parten de las esquinas de la penetración y su longitud es $2d$, medida en la superficie de la muestra. (Fuente: Adaptado de Mechanical Behavior of Materials, por T.H. Courtney, fig. 1-21. Copyright © 2000, The McGraw-Hill Companies. Reproducida con autorización.)

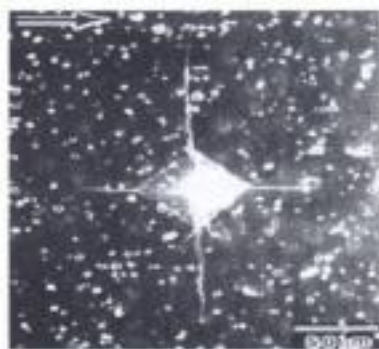


Figura 6-33 Micrografía electrónica de barrido donde se muestra la propagación de grietas en un cerámico PZT. (Cortesía de Wang y Raj N. Singh, *Ferroelectrics*, 207, 555-575 (1998).)

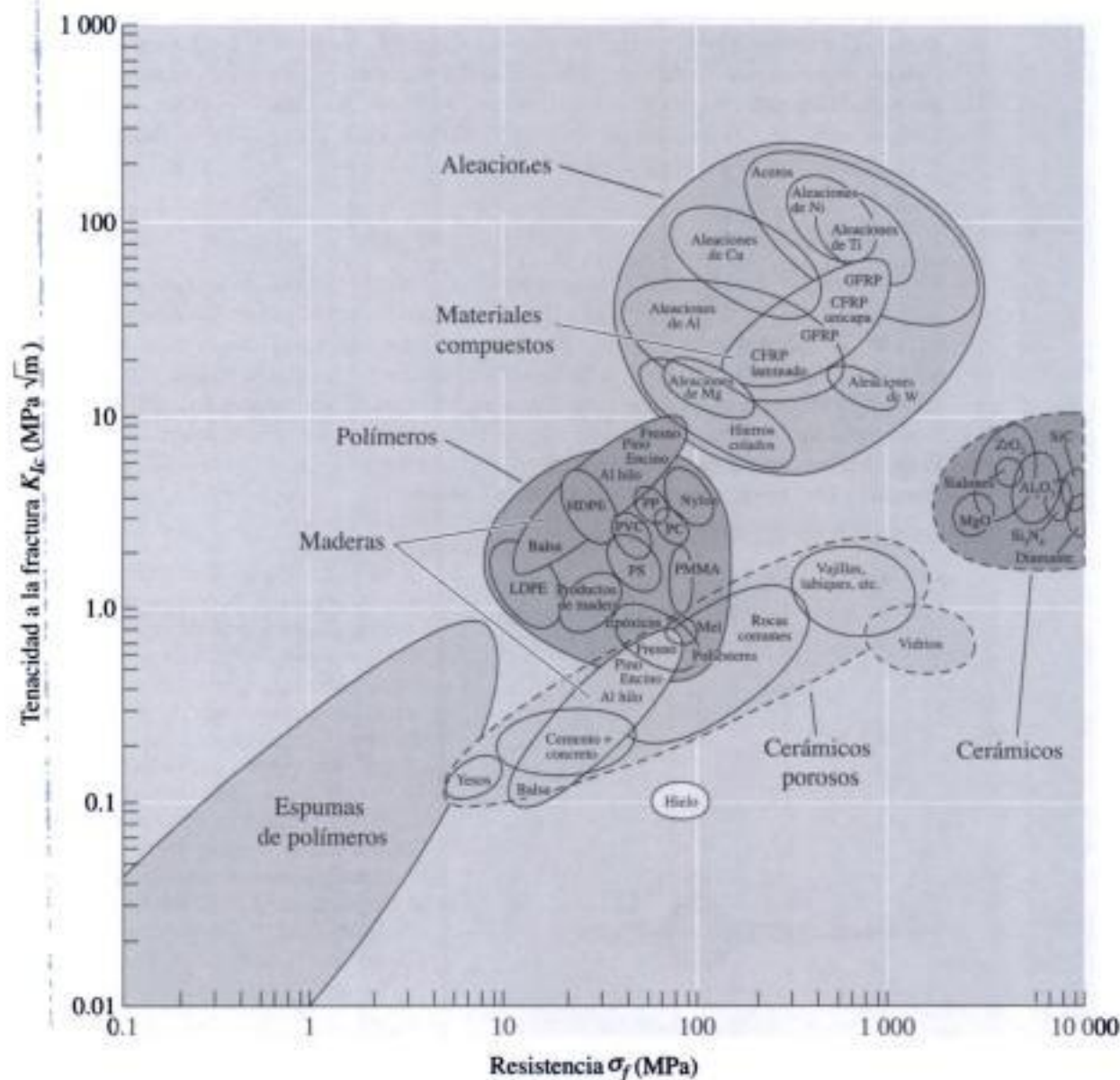


Figura 6-34 Tenacidad a la fractura y resistencia de diversos materiales. (Fuente: Adaptado de *Mechanical Behavior of Materials*, por T.H. Courtney, 2000, p. 434, fig. 9-18. Copyright © 2000, The McGraw-Hill Companies. Adaptado con autorización.)

6-11 Importancia de la mecánica de fracturas

El método de mecánica de fractura permite diseñar y seleccionar materiales teniendo en cuenta al mismo tiempo la presencia inevitable de imperfecciones. Se deben considerar tres variables: la propiedad del material (K_c o K_{Ic}), el esfuerzo σ que debe resistir el material, y el tamaño de la imperfección a . Si se conocen dos de esas tres variables, se puede determinar la tercera.

Selección de un material Si se conoce el tamaño máximo a de las imperfecciones en el material y la magnitud del esfuerzo aplicado, se puede seleccionar un material que tenga una tenacidad a la fractura de K_c o K_{Ic} suficientemente grande como para evitar que crezca la imperfección.

Diseño de un componente Si se conoce el tamaño máximo de cualquier imperfección y el material (y, en consecuencia, su K_c o K_{Ic}) ya fue seleccionado, se puede calcular el esfuerzo máximo que puede resistir el componente. Entonces se puede diseñar el tamaño adecuado de la parte para asegurar que no se exceda el esfuerzo máximo.

Diseño de un método de fabricación o de ensayo Si se ha seleccionado el material, si se conoce el esfuerzo aplicado y el tamaño del componente es fijo, se puede calcular el tamaño máximo de la imperfección que se puede tolerar. Una técnica de ensayo no destructivo que detecte cualquier imperfección mayor que su tamaño crítico, puede ayudar a asegurar que la parte funcionará con seguridad. Además se observa que, si se selecciona el proceso correcto de manufactura, se pueden producir imperfecciones menores a este tamaño crítico.

EJEMPLO 6-8 Diseño de un ensayo no destructivo

Una placa de acero que se usa en un reactor nuclear tiene una tenacidad a la fractura por deformación plana de 80 000 psi $\sqrt{\text{pulg}}$, y se expone a un esfuerzo de 45,000 psi durante el servicio. Diseñe un procedimiento de inspección de prueba capaz de determinar una grieta en la orilla de la placa, antes de que esa grieta pueda crecer con una rapidez catastrófica.

SOLUCIÓN

Se debe determinar el tamaño mínimo de una grieta que se vaya a propagar en el acero bajo estas condiciones. Según la ecuación 6-18, y suponiendo que $f = 1.12$:

$$\begin{aligned} K_{Ic} &= f\sigma\sqrt{a\pi} \\ 80\,000 &= (1.12)(45\,000)\sqrt{a\pi} \\ a &= 0.8 \text{ pulg} \end{aligned}$$

Una grieta de 0.8 pulg de profundidad en la orilla debe ser relativamente fácil de detectar. Con frecuencia se pueden observar visualmente grietas de este tamaño. Hay una diversidad de otros ensayos, como, por ejemplo, la inspección con líquidos penetrantes, la inspección con partículas magnéticas y con corrientes parásitas, también detectan grietas mucho menores que ésta. Si la rapidez de crecimiento de una grieta es lenta y la inspección se hace con regularidad, una grieta debe ser descubierta mucho antes de llegar a este tamaño crítico.

Fractura frágil Toda grieta o imperfección limita la capacidad de un cerámico para resistir un esfuerzo a la tensión. Esto se debe a que una grieta (que a veces se llama **imperfección de Griffith**) concentra y amplifica el esfuerzo aplicado. La figura 6-35 muestra una grieta de



Figura 6-35

Esquema de una imperfección o grieta de Griffith en un cerámico.

longitud a en la superficie de un material frágil. También se indica el radio r de la grieta. Cuando se aplica un esfuerzo de tensión σ , el esfuerzo real en la punta de la grieta es:

$$\sigma_{\text{real}} \cong 2\sigma\sqrt{a/r} \quad (6-21)$$

Para grietas muy delgadas (r) o largas (a), la relación $\sigma_{\text{real}}/\sigma$ se hace grande, es decir, se intensifica el esfuerzo. Si el esfuerzo σ_{real} es mayor que la resistencia a la cedencia, la grieta crece y termina por causar la falla, aunque el esfuerzo nominal σ aplicado sea grande.

En un método distinto, se reconoce que un esfuerzo aplicado causa una deformación elástica, relacionada con el módulo de elasticidad E , dentro del material. Cuando se propaga una grieta, esta energía de deformación se libera y se reduce la energía total. Sin embargo, al mismo tiempo se crean dos nuevas superficies al extenderse la grieta; esto aumenta la energía asociada con la superficie. Si se balancean las energías de deformación y superficial, se observa que el esfuerzo crítico necesario para que la grieta se propague se determina con la ecuación de Griffith:

$$\sigma_{\text{crítica}} \cong 2\sigma\sqrt{\frac{E\gamma}{\pi a}} \quad (6-22)$$

donde a es la longitud de una grieta superficial (o la mitad de la longitud de una grieta interna) y γ es la energía superficial (por unidad de área). De nuevo, esta ecuación indica que, aunque las grietas sean pequeñas, se limita mucho la resistencia de la cerámica.

También se observa que si se reordena la ecuación 6-18, que describía el factor de intensidad de esfuerzo K , se obtiene

$$\sigma = \frac{K}{f\sqrt{\pi a}} \quad (6-23)$$

Esta ecuación tiene una forma parecida a la de la ecuación 6-22. Cada una de estas ecuaciones indica la dependencia de las propiedades mecánicas respecto al tamaño de las imperfecciones presentes en la cerámica. El desarrollo de procesos de manufactura que reduzcan al mínimo el tamaño de las imperfecciones se vuelve determinante para mejorar la resistencia de las cerámicas.

Las imperfecciones tienen la máxima importancia cuando sobre el material actúan esfuerzos de tensión. Los esfuerzos de compresión tienden a cerrar las grietas, no a abrirlas; en consecuencia, las cerámicas suelen tener muy buenas propiedades a la compresión.

EJEMPLO 6-9 Propiedades de la cerámica SiAlON

Suponga que el sialón (acrónimo de SiAlON, *oxinitruro de silicio y aluminio*), una cerámica avanzada, tiene una resistencia a la tensión de 60 000 psi. Suponga que este valor es para una cerámica sin imperfecciones. (En la práctica, es casi imposible producir cerámicas sin imperfecciones.) Antes de probar un componente de sialón, se observa una grieta delgada de 0.01 pulg de profundidad. Dicha parte falla en forma inesperada a un esfuerzo de 500 psi por propagación de la grieta. Estime el radio de la punta de la grieta.

SOLUCIÓN

La falla fue debido al esfuerzo aplicado de 500 psi, aumentado por concentración de esfuerzo en la punta de la grieta; produjo un esfuerzo real igual a la resistencia a la tensión. De acuerdo con la ecuación 6-21:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{real}} &= 2\sigma\sqrt{a/r} \\ 60\,000 \text{ psi} &= (2)(500 \text{ psi})\sqrt{0.01 \text{ pulg}/r} \\ \sqrt{0.01/r} &= 60 \quad \text{o} \quad 0.01/r = 3600 \\ r &= 2.8 \times 10^{-6} \text{ pulg} = 7.1 \times 10^{-6} \text{ cm} = 710 \text{ \AA}\end{aligned}$$

La probabilidad de poder medir un radio de curvatura de ese tamaño, por cualquier método no destructivo, es virtualmente cero. En consecuencia, aunque la ecuación 6-21 puede ayudar a ilustrar los factores que influyen sobre cómo se propaga una grieta en un material frágil, no ayuda a predecir la resistencia de componentes reales de cerámica.

EJEMPLO 6-10 Diseño de un soporte de cerámica

Diseñe una placa de soporte de tres pulgadas de ancho de sialón, la cual tiene una tenacidad a la fractura de 9 000 psi $\sqrt{\text{pulg}}$, que resista una carga de tensión de 40 000 lb. La parte será probada en forma no destructiva para asegurar que no hayan imperfecciones que puedan causar su falla.

SOLUCIÓN

Supongamos que tenemos tres métodos de prueba no destructiva a la disposición: una radiografía con rayos X puede detectar imperfecciones mayores que 0.02 pulg; una radiografía con rayos gamma puede detectar imperfecciones mayores que 0.008 pulg, y una inspección ultrasónica puede detectar imperfecciones mayores que 0.005 pulg. Para esos tamaños de imperfección, se debe calcular el espesor mínimo de la placa que asegure que no se propaguen las imperfecciones de esos tamaños.

A partir de la ecuación de tenacidad a la fractura y suponiendo que $f = 1$:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{max}} &= \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a}} = \frac{F}{A} \\ A &= \frac{F\sqrt{\pi a}}{K_{Ic}} = \frac{(40\,000)(\sqrt{\pi})(\sqrt{a})}{9\,000} \\ A &= 7.88\sqrt{a} \text{ pulg}^2 \text{ y espesor} = (7.88 \text{ pulg}^2/3 \text{ pulg}) \sqrt{a} = 2.63\sqrt{a}\end{aligned}$$

Método no destructivo	Grieta más pequeña detectable (pulg)	Área mínima (pulg ²)	Espesor mínimo (pulg)	Esfuerzo máximo (psi)
Radiografía con rayos X	0.020	1.11	0.37	36 000
Radiografía con rayos y	0.008	0.70	0.23	57 000
Inspección ultrasónica	0.020	0.56	0.19	71 000

La capacidad de detectar las imperfecciones, acoplada a la capacidad de producir una cerámica con imperfecciones menores que el límite de detección, afecta mucho el esfuerzo máximo que se puede tolerar y, en consecuencia, el tamaño de la parte. En este ejemplo, la parte puede ser menor si se dispone de inspección ultrasónica.

También es importante la tenacidad a la fractura. Si se hubiera usado Si_3N_4 con una tenacidad a la fractura de 3 000 psi $\sqrt{\text{pulg}}$ en lugar del sialón, podríamos repetir los cálculos para demostrar que, para el ensayo ultrasónico, el espesor mínimo es 0.56 pulg y el esfuerzo máximo es sólo de 24 000 psi.

6-12 Propiedades microestructurales de la fractura en materiales metálicos

Fractura dúctil La fractura dúctil se suele producir en forma **transgranular** (a través de los granos) en los metales con buena ductilidad y tenacidad. Con frecuencia, se observa una deformación apreciable, incluyendo la formación de un cuello, un entallamiento o estricción localizado, en el componente que falló. La deformación sucede antes de la fractura final. Las fracturas dúctiles suelen ser causadas por sobrecargas simples o al aplicar un esfuerzo demasiado grande al material.

En un ensayo de tensión simple, la fractura dúctil comienza con la nucleación, el crecimiento y la coalescencia de microhuecos en el centro de la barra de ensayo (Fig. 6-36). Los **microhuecos** se forman cuando un gran esfuerzo causa la separación del metal en los límites de grano

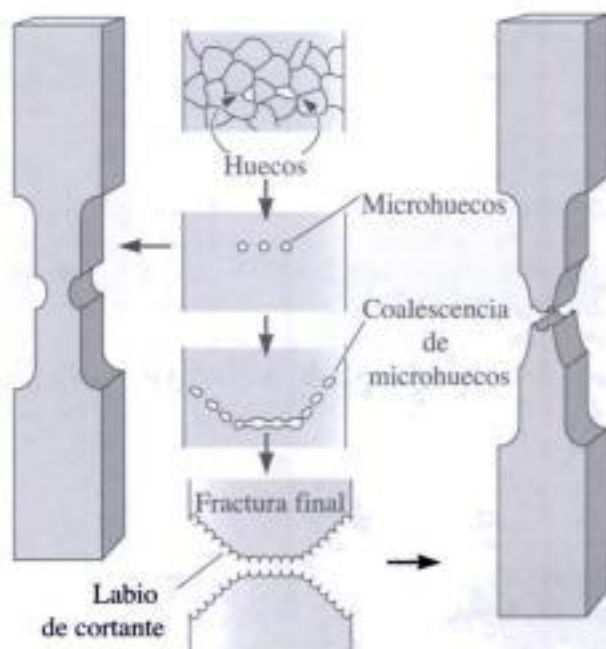


Figura 6-36

Cuando se somete a tensión un material dúctil en un ensayo, comienzan a formarse un cuello y huecos, iniciando cerca del centro de la barra, por nucleación en límites de grano o en inclusiones. A medida que continúa la deformación, se puede formar un labio de corte y producirse una fractura tipo copa y cono.

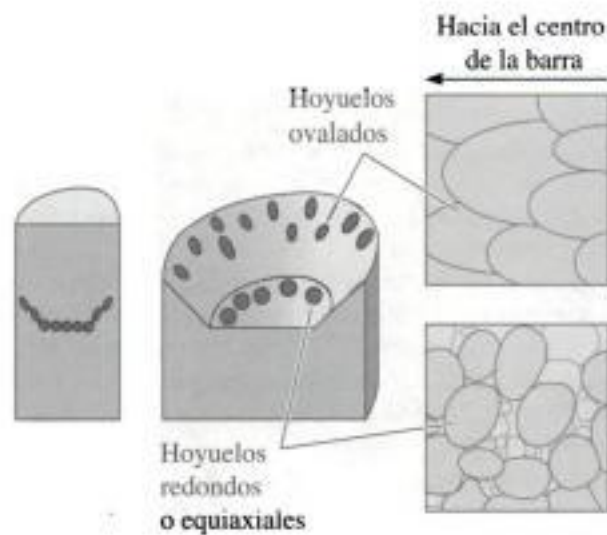


Figura 6-37

Hoyuelos que se forman en una fractura dúctil. En el centro se forman hoyuelos equiaxiales, donde crecen los microhuecos. Los hoyuelos alargados, que apuntan hacia el origen de la falla, se forman en el labio de corte.

o interfaces entre el metal y pequeñas partículas de impurezas (inclusiones). Al aumentar el esfuerzo local, los microhuecos crecen y coalescen formando cavidades más grandes. Al final, el área de contacto de metal con metal es demasiado pequeña para soportar la carga y se produce la fractura.

También la deformación por deslizamiento contribuye a la fractura dúctil de un metal. Se sabe que el deslizamiento tiene lugar cuando el esfuerzo cortante resuelto llega a su valor crítico, y los esfuerzos cortantes resueltos son máximos en un ángulo de 45° respecto al esfuerzo de tensión aplicado (capítulo 4; ley de Schmid).

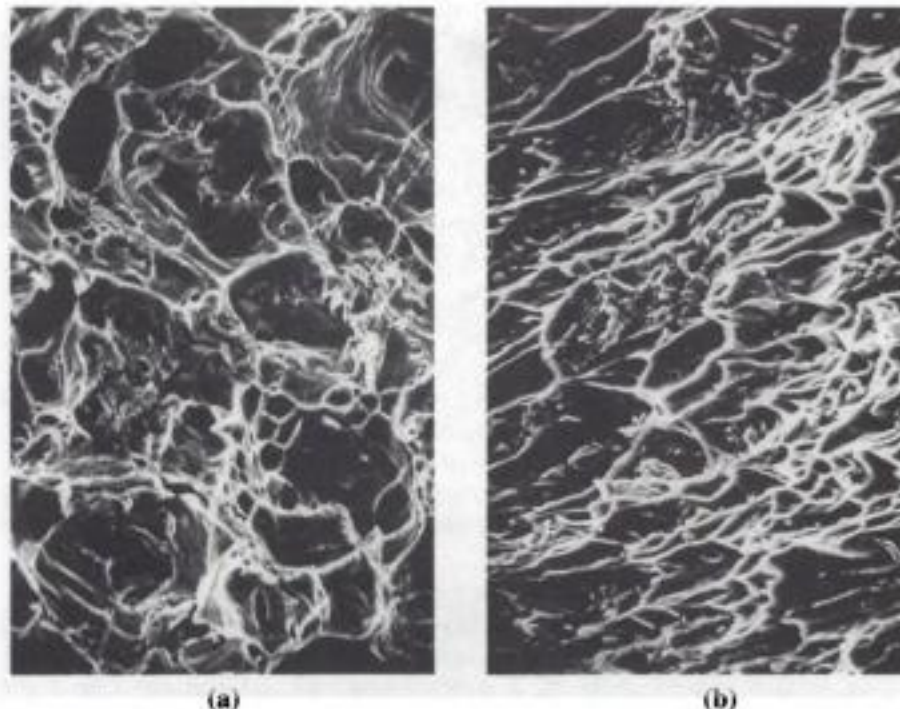


Figura 6-38 Micrografías electrónicas de barrido de un acero 1018 recocido, que muestran una fractura dúctil producida en un ensayo de tensión. (a) Los hoyuelos equiaxiales son planos en el centro de la zona de fractura, y (b) los hoyuelos alargados en el labio de corte (1250 $\times$).

Estos dos aspectos de fractura dúctil proporcionan características particulares a la superficie que falló. En secciones metálicas gruesas, se espera encontrar evidencia de formación de cuello, con una parte apreciable de la superficie de fractura teniendo una cara plana donde primero se nuclearon y coalescieron los microhuecos, y un labio menor de cortante, donde la superficie de fractura forma un ángulo de 45° con el esfuerzo aplicado. El labio de corte indica que sucedió deslizamiento, y da a la fractura un aspecto de copa y cono (Figs. 6-12 y 6-37). La observación macroscópica sencilla de esta fractura puede ser suficiente para identificar el modo de fractura dúctil.

El examen de la superficie de fractura a alta magnificación, quizá con un microscopio electrónico de barrido, revela una superficie con hoyuelos (Fig. 6-37). Los hoyuelos son huellas de los microhuecos producidos durante la fractura. Normalmente, esos microhuecos son redondos o equiaxiales cuando un esfuerzo normal de tensión produce la falla [Fig. 6-38(a)]. Sin embargo, en el labio de corte, los hoyuelos son ovalados o alargados, y los óvalos apuntan hacia el origen de la fractura [Fig. 6-38(b)].

En una placa delgada, se observa menos entallamiento o formación de cuello, y toda la superficie de la fractura puede ser una cara de cortante. El examen microscópico de la fractura muestra hoyuelos alargados, y no equiaxiales, que indican una proporción de deslizamiento mayor a 45° que en los metales más gruesos.

EJEMPLO 6-11 *Análisis de la falla de una cadena de grúa*

Falló una cadena que se usaba para levantar cargas pesadas. El examen del eslabón roto indica que hay bastante deformación y que se formó un cuello antes de la fractura. Haga una lista de las posibles razones de la falla.

SOLUCIÓN

Esta descripción sugiere que la cadena falló en forma dúctil por una sobrecarga simple de tensión. Dos factores podrían ser responsables de esa falla:

1. La carga rebasó la capacidad de levantamiento de la cadena. Así, el esfuerzo debido a la carga rebasó el punto de cedencia de la cadena y permitió su falla. La comparación de la carga con las especificaciones de la cadena mostrará que la cadena no estaba planeada para esa carga tan pesada. ¡Es falla del usuario!
2. La cadena tenía la composición incorrecta o su tratamiento térmico fue incorrecto. En consecuencia, la resistencia de cedencia fue menor que la que especificaba el fabricante, y no pudo soportar la carga. ¡Podría ser falla del fabricante!

Fractura frágil La fractura frágil sucede en los metales y aleaciones de alta resistencia o en los metales y aleaciones con mala ductilidad y tenacidad. Además, aun los metales que normalmente son dúctiles pueden fallar en forma frágil a bajas temperaturas, en secciones gruesas, a grandes velocidades de deformación (por ejemplo, por impacto) o cuando las imperfecciones desempeñan un papel importante. Las fracturas frágiles se observan con frecuencia cuando es el impacto y no la sobrecarga lo que causa la falla.

En la fractura frágil se requiere poca o ninguna deformación plástica. La iniciación de la grieta sucede, normalmente, en las imperfecciones pequeñas que causan una concentración de esfuerzo. La grieta puede moverse con una velocidad que tiende a la velocidad del sonido en el metal. Normalmente, la grieta se propaga con más facilidad a lo largo de planos cristalográficos específicos, que con frecuencia son los planos $\{100\}$, por clivaje. Sin embargo, en algunos casos la grieta puede tomar una trayectoria **intergranular** (a lo largo de los límites de grano), en especial cuando la segregación (separación preferencial de distintos elementos) o inclusiones debilitan los límites de grano.

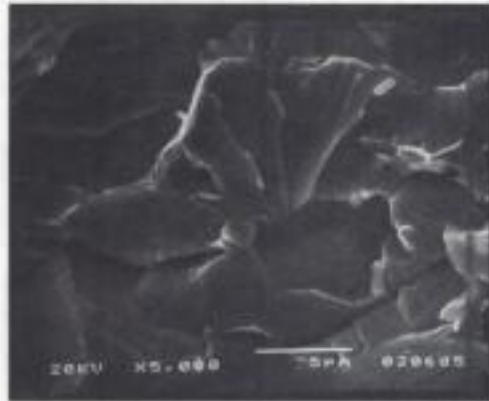


Figura 6-39

Micrografía electrónica de barrido de una fractura frágil, que muestra la superficie de un acero 1010 templado (5000 $\times$). (Cortesía de C.W. Ramsay.)

La fractura frágil se puede identificar observando las características de la superficie que falló. Normalmente, la superficie de fractura es lisa y perpendicular al esfuerzo aplicado en un ensayo de tensión. Si la falla sucede por clivaje, cada grano fracturado es liso y tiene orientación diferente, y la superficie de fractura presenta un aspecto cristalino o de una superficie característica de un "caramelo macizo" roto (Fig. 6-39). Con frecuencia, quien desconoce esta materia dice que el metal falló porque se cristalizó. Claro que nosotros sabemos que el metal era cristalino desde un principio, y que la apariencia de la superficie se debe a los planos de clivaje.

Otra propiedad común de las fracturas es el **patrón de Chevrón** (Fig. 6-40), producida por frentes separados de grieta que se propagan a distintos niveles en el material. Se forma un patrón de marcas o lomos superficiales que irradian alejándose del origen de la grieta (Fig. 6-41). El patrón de Chevrón se ve a simple vista o con una lupa, y ayuda a identificar tanto la naturaleza frágil del proceso de falla como el origen de la misma.



Figura 6-40

Patrón de Chevrón en un acero 4340 templado, de 0.5 pulg de diámetro. El acero falló en forma frágil por un golpe de impacto.

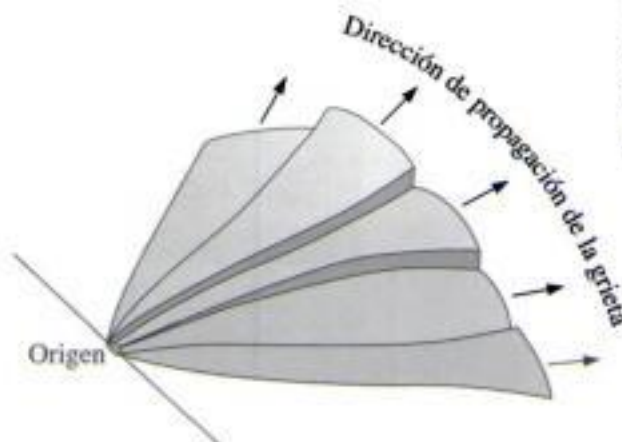


Figura 6-41

El patrón de Chevrón se forma a medida que la grieta se propaga a diversos niveles desde el origen. El patrón de puntos apunta hacia el origen.

EJEMPLO 6-12 *Análisis de falla de un eje automotriz*

Un ingeniero investiga la causa de un accidente automotriz, y encuentra que la rueda trasera derecha se rompió en el eje. El eje está doblado. La superficie de fractura muestra un patrón de Chevrón que apunta hacia la superficie del eje. Proponga una posible causa de la fractura.

SOLUCIÓN

Las pruebas parecen indicar que el eje no se había roto antes del accidente. El eje deformado indica que la rueda seguía fija cuando se aplicó la carga. El patrón de Chevrón indica que la rueda fue sometida a un golpe intenso de impacto, que se transmitió al eje y causó su falla. Las pruebas preliminares parecen indicar que el conductor perdió el control y chocó, y que la fuerza del choque causó la ruptura del eje. Un examen posterior de la superficie de la fractura, la microestructura, la composición y las propiedades podría comprobar que el eje se fabricó en forma correcta.

6-13 Propiedades microestructurales de las fracturas en cerámicos, vidrios y materiales compuestos

En los materiales cerámicos, los enlaces iónicos o covalentes permiten poco o ningún deslizamiento. En consecuencia, la falla es un resultado de fractura frágil. La mayoría de los cerámicos cristalinos fallan por clivaje a lo largo de planos de empaquetamiento compactos a distancias grandes entre sí. La superficie de fractura suele ser lisa y con frecuencia no hay particularidades en la superficie que apunten hacia el origen de la fractura [Fig. 6-42(a)].

Los vidrios también se rompen en forma frágil. Frecuentemente se observa una superficie **concoidal**, de la fractura. Esta superficie contiene una zona especular (como espejo) muy lisa cerca del origen de la fractura, y hay líneas de rasgado en el resto de la superficie [Fig. 6-42(b)]. Las líneas de rasgado apuntan hacia la zona especular y hacia el origen de la ruptura, en forma parecida a la del patrón de Chevrón en los metales.



Figura 6-42 Micrografías electrónicas de barrido de superficies de fractura en cerámicos. (a) La superficie de fractura de Al_2O_3 , mostrando los planos de clivaje (1250 $\times$) y (b) la superficie de fractura del vidrio, mostrando la zona especular (arriba) y las líneas de rasgado características de una fractura concoidal (300 $\times$).

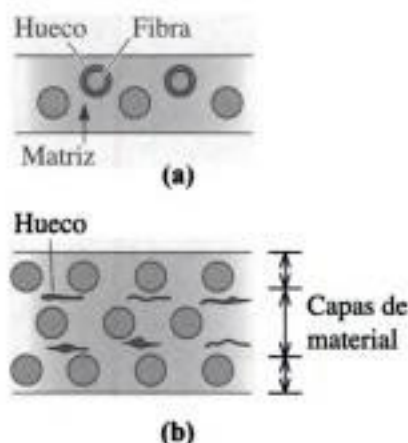


Figura 6-43

Materiales compuestos reforzados con fibras; pueden fallar por diversos mecanismos. (a) Por adhesión débil entre la matriz y las fibras; las fibras se pueden salir de la matriz y formar huecos. (b) Si las capas individuales de la matriz están mal pegadas, la matriz se puede delaminar, formando huecos.

Los polímeros pueden fallar por un mecanismo que puede ser dúctil o frágil. Abajo de la temperatura de transición vítrea, los polímeros termoplásticos fallan en forma frágil; en forma parecida al vidrio. De igual modo, los polímeros termofijos, que son duros, fallan por un mecanismo frágil. Sin embargo, algunos plásticos cuya estructura consiste en cadenas enredadas pero sin enlaces químicos cruzados, fallan en forma dúctil arriba de la temperatura de transición vítrea, mostrando evidencias de extensas deformaciones y hasta formación de cuello antes de la falla. El comportamiento dúctil es resultado del deslizamiento de las cadenas de polímero, que no es posible en los polímeros vítreos o termofijos. Los polímeros termofijos tienen una estructura rígida, tridimensional y con enlaces cruzados.

La fractura en materiales compuestos reforzados con fibras es más compleja. Lo normal es que esos materiales contengan fibras resistentes y frágiles, rodeadas de una matriz suave y dúctil, como por ejemplo, en el aluminio reforzado con boro. Cuando se aplica un esfuerzo de tensión a lo largo de las fibras, el aluminio suave se deforma de manera dúctil, con formación y coalescencia de huecos que eventualmente produce una superficie de fractura con hoyuelos. Al deformarse el aluminio, la carga ya no se transmite bien a las fibras; éstas se rompen en forma frágil hasta que hay muy pocas de ellas para soportar la carga final.

El fracturamiento es más común si la adhesión entre las fibras y la matriz es mala. En ese caso, se pueden formar huecos entre la fibra y la matriz, causando disgregación. También se pueden formar huecos entre las capas de la matriz, si las cintas u hojas compuestas no están bien adheridas, con lo que se produce **delaminación u hoqueo** (Fig. 6-43). En este contexto, la delaminación significa que comienzan a separarse las capas de los distintos materiales.

EJEMPLO 6-13

Fractura en materiales compuestos

Describe la diferencia de los mecanismos de fractura en un material compuesto de aluminio reforzado con boro y un material compuesto de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio.

SOLUCIÓN

En el material compuesto de boro y aluminio, la matriz de aluminio es suave y dúctil, por lo que cabe esperar que falle en forma dúctil. En contraste, las fibras de boro fallan en forma frágil. Las fibras de vidrio y la resina epóxica son ambas frágiles; por consiguiente, el material compuesto en su conjunto debe mostrar evidencia de fractura dúctil.

6-14 Estadística de Weibull para análisis de resistencia a la falla

Cuando se evalúa la resistencia de los materiales cerámicos, se necesita un método estadístico. La resistencia de los cerámicos y los vidrios depende del tamaño y la distribución de los tamaños de las imperfecciones. En estos materiales, las imperfecciones se originan en el proceso de manufactura. También los vidrios pueden desarrollar microgrietas causadas por la interacción con el vapor de agua en el aire. Si se ensayan componentes de alúmina u otras cerámicas, de diversos tamaños y geometrías, con frecuencia se encuentra una gran dispersión en los valores medidos, aun cuando su composición nominal sea igual. De igual manera, si se ensaya la resistencia de fibras de vidrio de determinada composición, se observa que, en promedio, las fibras más cortas son más resistentes que las largas. La resistencia de los cerámicos y los vidrios depende de la probabilidad de encontrar una imperfección que rebase cierto tamaño crítico. Para los componentes más grandes, o para las fibras más grandes, aumenta esa probabilidad. El resultado es que la resistencia de los componentes o las fibras más grandes probablemente sea menor que la de componentes o fibras más cortos. En los materiales metálicos o poliméricos, que pueden tener deformaciones plásticas relativamente grandes, el efecto de las imperfecciones y la distribución del tamaño de las mismas no se nota tanto como en los cerámicos y los vidrios. En esos materiales, las grietas que se inician en las imperfecciones se achatan por deformación plástica. Así, para materiales dúctiles, la función de distribución de la resistencia es angosta y se aproxima a una distribución de Gauss. Sin embargo, la resistencia de los cerámicos y los vidrios varía en forma considerable; es decir, si se ensaya una gran cantidad de muestras idénticas de vidrio de sílice o cerámica de alúmina, los datos estarán muy dispersos, debido a cambios en la distribución de los tamaños de imperfecciones. La resistencia de los materiales frágiles, como los cerámicos y los vidrios, no es gaussiana; se apeg a la **distribución de Weibull**. [12] Esta distribución es un indicador de la variabilidad de la resistencia de los materiales, debida a una distribución de tamaños de las imperfecciones. El comportamiento frágil es el resultado de imperfecciones con tamaño crítico en el material con una distribución de tamaños de imperfecciones; es decir, la falla debida al eslabón más débil de una cadena.

La distribución de Weibull de la figura 6-44 describe la fracción de las muestras que fallan a distintos esfuerzos aplicados. A bajos esfuerzos, hay una pequeña fracción de las muestras que contienen imperfecciones del tamaño suficientemente grande como para causar la fractura; la mayoría de ellas falla a un esfuerzo aplicado de magnitud intermedia, y unas pocas sólo contienen pequeñas imperfecciones y no fallan sino hasta que se les aplican grandes esfuerzos. Para fines de predicción, se prefiere que la distribución sea muy angosta.

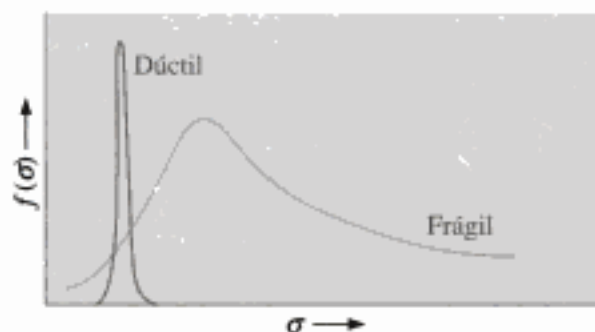


Figura 6-44 La distribución de Weibull describe la fracción de las muestras que fallan a determinado esfuerzo aplicado.

Imaginemos un cuerpo de volumen V con una distribución de imperfecciones, sometido a un esfuerzo σ . Si suponemos que el volumen V está formado por n elementos de volumen V_0 y que cada elemento tuviera la misma distribución de tamaño de imperfección, se puede demostrar que la probabilidad $P(V_0)$ de supervivencia, es decir, la probabilidad de que no se fracture un material frágil bajo el esfuerzo aplicado σ , es:

$$P(V_0) = \exp \left[- \left(\frac{\sigma - \sigma_s}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (6-24)$$

La probabilidad de falla, $F(V_0)$, se puede escribir como sigue:

$$F(V_0) = 1 - P(V_0) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma - \sigma_s}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (6-25)$$

En las ecuaciones 6-24 y 6-25, σ es el esfuerzo aplicado, σ_0 es la resistencia característica (que con frecuencia se supone que es igual a la resistencia promedio), σ_s es la magnitud del esfuerzo abajo del cual la probabilidad de falla es cero (es decir, la probabilidad de supervivencia es 1.0). En estas ecuaciones, m es el módulo de Weibull. En teoría, los valores del módulo de Weibull pueden ir de 0 a ∞ . Ese módulo es una medida de la variabilidad de la resistencia del material.

El módulo de Weibull m indica la variabilidad de la resistencia. Para metales y aleaciones, ese módulo es ~ 100 . Para los cerámicos tradicionales (como ladrillos, alfarería), el módulo de Weibull es menor que 3. Los cerámicos diseñados en los que el procesamiento se controla mejor y, por consiguiente, es de esperar que la cantidad de imperfecciones sea menor, el módulo de Weibull es de 5 a 10.

Obsérvese que para los cerámicos y otros sólidos frágiles se puede suponer que $\sigma_s = 0$. Esto se debe a que hay una magnitud de esfuerzo, distinta de cero, para la que se puede decir que un material frágil no falla. Para los *materiales frágiles*, las ecuaciones 6-24 y 6-25 se pueden replantear como sigue:

$$P(V_0) = \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (6-26)$$

y

$$F(V_0) = 1 - P(V_0) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (6-27)$$

De acuerdo con la ecuación 6-26, para un esfuerzo aplicado σ igual a cero, la probabilidad de supervivencia es 1. A medida que aumenta el esfuerzo aplicado σ , $P(V_0)$ disminuye y tiende a cero a valores de esfuerzo aplicado muy altos. También se puede describir otro significado del parámetro σ_0 . En la ecuación 6-26, cuando $\sigma = \sigma_0$, la probabilidad de supervivencia se vuelve $1/e \approx 0.37$. En consecuencia, σ_0 es el valor del esfuerzo para el cual la probabilidad de supervivencia es ≈ 0.37 o 37%. También se puede decir que σ_0 es el valor del esfuerzo para el cual la probabilidad de falla es ≈ 0.63 o 63%.

Las ecuaciones 6-26 y 6-27 se pueden modificar para tener en cuenta muestras con distintos volúmenes. Se puede demostrar que, para tener igual probabilidad de supervivencia, las muestras con volúmenes mayores tendrán menores resistencias. Es lo que dijimos antes: las fibras de vidrio más largas serán más débiles que las más cortas.

Los siguientes ejemplos ilustran cómo se pueden usar las gráficas de Weibull para analizar las propiedades mecánicas de los materiales y para diseñar componentes.

EJEMPLO 6-14 Módulo de Weibull para acero y para cerámica de alúmina

La figura 6-45 muestra las gráficas log-log de la probabilidad de falla y la resistencia de un acero simple al 0.2% de carbono, y de una cerámica de alúmina preparada por procesamiento convencional de polvos de alúmina compactados y sinterizados a temperaturas elevadas. También se incluye una gráfica para cerámica de alúmina preparada con técnicas especiales, que produce un tamaño de partícula mucho más uniforme y controlado. Esto a su vez reduce las imperfecciones al mínimo. Estas muestras se identifican como CPS (*controlled particle size*). Comente la naturaleza de estas gráficas.

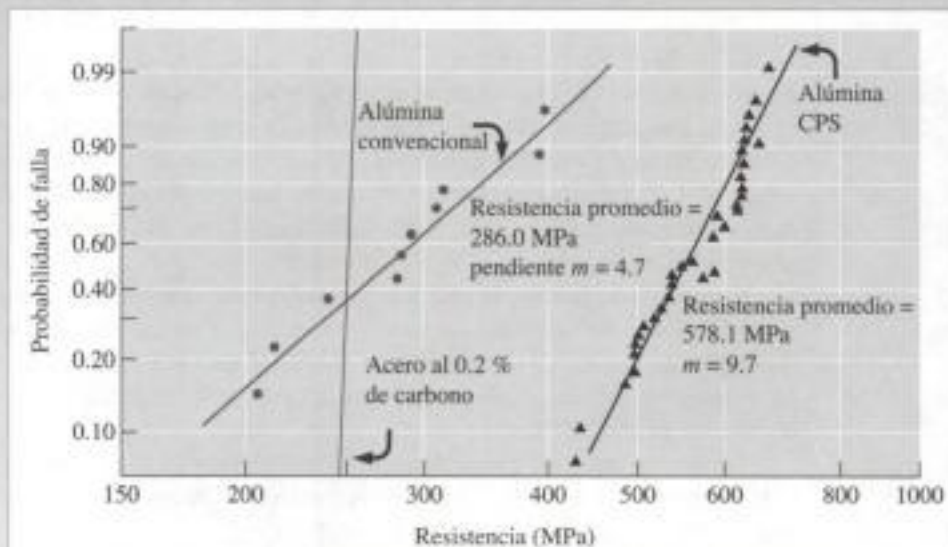


Figura 6-45 Gráfica (con papel de escalas especiales) de la probabilidad acumulada de que una muestra falle en determinado esfuerzo; da como resultado el módulo de Weibull, es decir, la pendiente. La alúmina producida con dos métodos distintos se compara con el acero al bajo carbono. Cuando el módulo de Weibull es alto, se obtiene una buena confiabilidad en el diseño. (Fuente: *De Mechanical Behavior of Materials*, por M.A. Meyers y K.K. Chawla, 1999, Copyright © 1999, Prentice-Hall. Usado con autorización de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, N.J.)

SOLUCIÓN

La gráfica de probabilidad de falla contra resistencia, en escalas log-log, dan como resultado datos que se pueden ajustar a una línea recta. La pendiente de esas rectas indica la medida de variabilidad, es decir, el módulo de Weibull.

Para el acero al carbono, la recta es casi vertical; es decir, la pendiente o valor de m tiende esencialmente a valores grandes. Eso significa que hay muy poca variabilidad (de 5 a 10%) en la resistencia de distintas muestras del acero al 0.2% C.

Para la cerámica de alúmina preparada con el procesamiento tradicional, la variabilidad es alta; es decir, m es baja, ~ 4.7 .

Para las cerámicas procesadas mediante técnicas mejoradas y controladas, la m es mayor, ~ 9.7 , lo cual indica que hay una distribución más uniforme de imperfecciones. La resistencia promedio también es mayor (~ 578 MPa), lo que parece indicar una menor cantidad de imperfecciones que causan la fractura.

EJEMPLO 6-15 Resistencia de cerámicos y probabilidad de falla

Una cerámica diseñada tiene un módulo de Weibull $m = 9$. La resistencia a la flexión es 250 MPa a una probabilidad de falla $F = 0.4$. ¿Cuál es el valor de la resistencia a la flexión si la probabilidad de falla debe ser 0.1?

SOLUCIÓN

Se supondrá que todas las muestras ensayadas tienen el mismo volumen y, en consecuencia, el tamaño de la muestra no interviene en este caso. Se puede usar el símbolo V para indicar el volumen de la muestra, en lugar de V_0 . Se trata de un material frágil, por lo que se comienza con la ecuación 6-27.

$$F(V) = 1 - P(V) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

o sea

$$1 - F(V) = \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

Se obtienen logaritmos de ambos lados, para obtener

$$\ln [1 - F(V)] = \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

De nuevo, se obtienen logaritmos de ambos lados:

$$\ln [\ln [1 - F(V)]] = -m(\ln \sigma - \ln \sigma_0) \quad (6-28)$$

Se puede eliminar el signo menos en el lado derecho de esta ecuación, reordenándola como sigue:

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(V)} \right) \right] = m(\ln \sigma - \ln \sigma_0) \quad (6-29)$$

Para $F = 0.4$, $\sigma = 250$ MPa, y $m = 9$, por lo que, de acuerdo con la ecuación 6-29,

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - 0.4} \right) \right] = 9(\ln 250 - \ln \sigma_0) \quad (6-30)$$

Por consiguiente, $\ln [\ln (1/0.6)] = \ln [(1.66667)] = \ln [0.510826] = -0.67173 = 9(5.52146 - \ln \sigma_0)$.

Así, $\ln \sigma_0 = 5.52146 + 0.07464 = 5.5961$. Esto da como resultado $\sigma_0 = 269.4$ MPa. Es la resistencia característica del cerámico, que con frecuencia se toma como resistencia promedio de la misma. Para un valor de esfuerzo de 269.4 MPa, la probabilidad de supervivencia es 0.37, o la probabilidad de falla es 0.63. A medida que baja la probabilidad requerida de falla (F), la magnitud del esfuerzo a la que se puede someter la cerámica (σ) también baja.

Ahora se desea determinar el valor de σ para el cual $F = 0.1$. Se sabe que $m = 9$ y que $\sigma_0 = 269.4$ Mpa, así que es necesario obtener el valor de σ . Se sustituyen estos valores en la ecuación 6-29:

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - 0.1} \right) \right] = 9(\ln \sigma - \ln 269.4)$$

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{0.9} \right) \right] = 9(\ln \sigma - \ln 269.4)$$

$$\begin{aligned}\ln(\ln 1.1111) &= \ln(0.105361) = -2.25037 = 9(\ln \sigma - 5.596097), \\ \therefore -0.25004 &= \ln \sigma - 5.596097, \text{ o sea} \\ \ln \sigma &= 5.346056\end{aligned}$$

o sea que $\sigma = 209.8$ MPa. Como se esperaba, al bajar la probabilidad de falla a 0.1, también bajó la magnitud del esfuerzo que se puede soportar.

EJEMPLO 6-16 *Determinación del módulo de Weibull*

Se probaron siete especímenes de carburo de silicio y se obtuvieron las siguientes resistencias a la fractura: 23, 49, 34, 30, 55, 43 y 40 MPa. Estime el módulo de Weibull para estos datos, ajustándolos a la ecuación 6-29. Describa la fiabilidad de la cerámica.

SOLUCIÓN

Primero debemos recordar que para cualquier clase de análisis estadístico se necesita una gran cantidad de muestras. Siete muestras no bastan; sin embargo, el objeto de este ejemplo es ilustrar el cálculo.

Un método sencillo, aunque no totalmente exacto, para determinar el comportamiento de la cerámica es asignar un orden numérico (1 a 7) a los especímenes; el valor 1 para el espécimen que tiene la menor resistencia a la fractura.

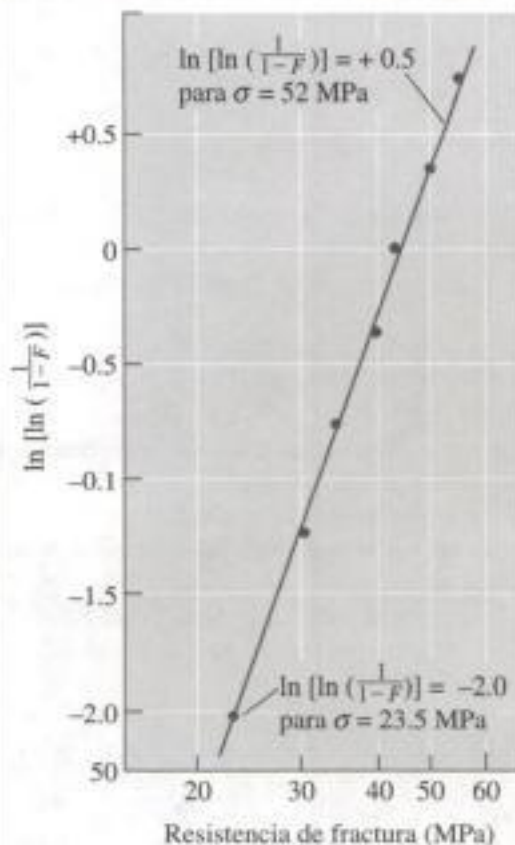


Figura 6-46

Gráfica de la probabilidad de falla acumulada en función del esfuerzo de fractura. Obsérvese que la resistencia de fractura se grafica en escala logarítmica.

La cantidad total de especímenes es n (en nuestro caso, 7). La probabilidad de falla F es, entonces, el orden numérico dividido entre $n + 1$ (en nuestro caso, entre 8). Entonces se puede graficar $\ln[\ln(1/(1 - F(V_0)))]$ en función de $\ln \sigma$. La tabla siguiente y la figura 6-46 muestran los resultados de estos cálculos. Obsérvese que σ se grafica en una escala logarítmica.

#simo Especimen	σ (MPa)	$F(V_0)$	$\ln[\ln 1/(1 - F(V_0))]$
1	23	$1/8 = 0.125$	-2.013
2	30	$2/8 = 0.250$	-1.246
3	34	$3/8 = 0.375$	-0.755
4	40	$4/8 = 0.500$	-0.367
5	43	$5/8 = 0.625$	-0.019
6	49	$6/8 = 0.750$	+0.327
7	55	$7/8 = 0.875$	+0.732

La pendiente de la línea ajustada, que es el módulo de Weibull m , es (usando los dos puntos indicados en la gráfica):

$$m = \frac{0.5 - (-2.0)}{\ln(52) - \ln(23.5)} = \frac{2.5}{3.951 - 3.157} = 3.15$$

Este módulo de Weibull es bajo, 3.15, y parece indicar que el cerámico tiene una resistencia a la fractura muy variable, lo cual dificulta su uso confiable en aplicaciones sujetas a cargas dinámicas grandes.

6-15

Fatiga

La **fatiga** es la disminución de la resistencia de un material debida a esfuerzos repetitivos, que pueden ser mayores o menores que la resistencia de cedencia.[13,14] Es un fenómeno común en componentes sujetos a cargas dinámicas de autos y aviones, álabes de turbinas, resortes, cigüeñales y demás maquinaria, implantes biomédicos y productos al consumidor como zapatos, que están sujetos en forma constante a cargas repetitivas en forma de tensión, compresión, flexión, vibración, dilatación térmica y contracción u otros. Esos esfuerzos con frecuencia son *menores* que la resistencia de cedencia del material. Sin embargo, cuando el esfuerzo se aplica una cantidad suficiente de veces, causa la falla por fatiga. Una fracción bastante grande de partes que se pueden encontrar en un desguazadero de automóviles corresponde a las que fallaron por fatiga. La posibilidad de falla por fatiga es la razón principal por la cual los componentes de aviones tienen una duración finita. La fatiga es un fenómeno interesante, porque el esfuerzo aplicado puede no rebasar el esfuerzo de cedencia. La fatiga puede presentarse aun cuando los componentes se sometan a esfuerzos arriba de la resistencia de cedencia. Un componente se somete, con frecuencia, a la aplicación repetida de un esfuerzo menor que la resistencia de cedencia del material.

Hay ejemplos de casos en los que ciertos materiales, como las películas delgadas de materiales ferroeléctricos, también muestran fatiga. Esta fatiga es de naturaleza eléctrica y se relaciona con la incapacidad que tienen los materiales de cambiar sus propiedades eléctricas como respuesta al campo aplicado. La descripción detallada de ella queda fuera del alcance de este libro. La esencia es que siempre que un componente se va a someter a fuerzas mecánicas, eléctricas, térmicas, magnéticas o de otra índole, que posiblemente sean cíclicas, se debe tener en cuenta el efecto de esos factores externos durante un periodo largo.

Las fallas por fatiga suelen presentarse en tres etapas. Primero, se inicia o nuclea una grieta diminuta, comúnmente en la superficie, con frecuencia mucho después de que comienza la carga. Normalmente, los sitios de nucleación están en o cerca de la superficie, donde el esfuerzo es máximo, e incluyen defectos superficiales como rayaduras o picaduras, cantos vivos debido a un diseño o manufactura deficiente, inclusiones, límites de grano o concentraciones de dislocaciones. A continuación, la grieta se propaga en forma gradual, a medida que la carga continúa cíclicamente. Por último, sucede una fractura repentina del material cuando su sección transversal restante es demasiado pequeña para sostener la carga aplicada. Así, los componentes fallan por fatiga porque, aun cuando el esfuerzo general aplicado pueda permanecer abajo de la resistencia de cedencia, a una escala de longitudes local, la intensidad del esfuerzo supera al punto de cedencia. Para que haya fatiga, al menos parte del esfuerzo en el material debe ser de tensión. Normalmente, uno se ocupa de fatiga de materiales metálicos y poliméricos.

En los cerámicos no se suele tener en cuenta la fatiga, porque estos materiales fallan normalmente debido a su baja tenacidad a la fractura. Todas las grietas de fatiga que se formen bajarán la vida útil del cerámico, porque causarán la disminución de la tenacidad a la fractura. En general, los cerámicos se diseñan para soportar carga estática, y no cíclica, y se toma en cuenta el módulo de Weibull.

También los materiales poliméricos muestran fallas por fatiga. El mecanismo de la fatiga en los polímeros es distinto que en los materiales metálicos. En los polímeros, cuando se someten a esfuerzos repetitivos, puede haber bastante calentamiento cerca de las puntas de las grietas, y las interrelaciones entre la fatiga y otro mecanismo llamado **termofluencia** (una deformación gradual que se describirá en la sección 6-18) afectan al comportamiento en general.

También es importante la fatiga cuando se manejan materiales compuestos. A medida que las fibras u otras fases de refuerzo comienzan a degradarse debido a la fatiga, el módulo de elasticidad general del material compuesto disminuye, y este debilitamiento se aprecia antes de que haya fractura debida a la fatiga.

Con frecuencia, es fácil identificar a las fracturas por fatiga. La superficie de fractura, en especial cerca de su origen, es normalmente lisa. Esa superficie se vuelve más áspera a medida que la grieta original aumenta de tamaño, y puede ser fibrosa durante la propagación final de la grieta. Los exámenes microscópicos y macroscópicos revelan una superficie de fractura donde se ve un patrón de marcas similar a la del mar en la playa, así como estriaciones (Fig. 6-47).

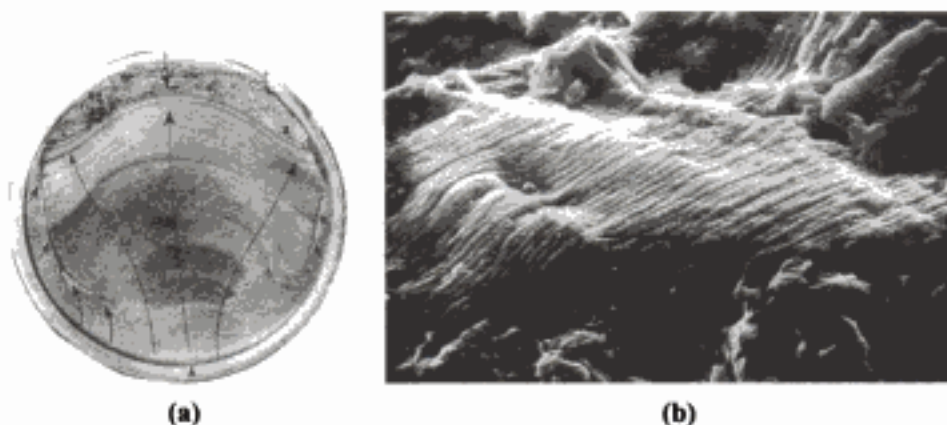


Figura 6-47 Superficie de fractura por fatiga. (a) Con pocos aumentos, el patrón de marcas de playa indica que la fatiga fue el mecanismo de la fractura. Las flechas indican la dirección de crecimiento del frente de grieta, cuyo origen está en la parte inferior. (La imagen (a) fue tomada de C.C. Cotell, "Fatigue Failures with Special Reference to Fracture Characteristics", Failure Analysis: The British Engine Technical Reports, American Society for Metals, 1981, p. 318.) (b) Con grandes aumentos se observan las estriaciones, muy cercanas entre sí, que se formaron durante la fatiga (1000 $\times$).

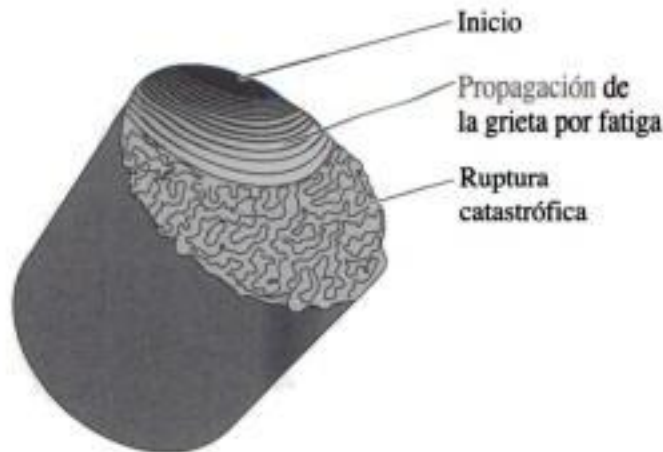


Figura 6-48

Esquema de una superficie de fractura por fatiga en una flecha de acero, mostrando la región de inicio, la propagación de la grieta de fatiga (con marcas de playa) y la ruptura catastrófica, cuando la longitud de la grieta rebasa de un cierto valor crítico, con el esfuerzo aplicado.

Las **marcas de playa** (Fig. 6-48) suelen formarse cuando cambia la carga durante el servicio o cuando la carga es intermitente, permitiendo quizás que haya tiempo para la oxidación dentro de la grieta. Las **estriaciones**, que se ven en una escala mucho más pequeña, muestran la posición de la punta de la grieta después de cada ciclo. Las marcas de playas siempre parecen indicar una falla por fatiga, pero, desafortunadamente, la ausencia de las marcas de playa no excluye la falla por fatiga.

EJEMPLO 6-17 *Análisis de falla de un cigüeñal por fatiga*

Un cigüeñal de un motor diesel falló. Al examinarlo, no se encuentra deformación plástica. La superficie de fractura es lisa. Además, hay otras grietas en otros lugares del cigüeñal. ¿Qué clase de mecanismo de falla cabe esperar?

SOLUCIÓN

Como el cigüeñal es una parte giratoria, la superficie está sometida a carga cíclica. De inmediato se debe sospechar que hay fatiga. La ausencia de deformación plástica avala la sospecha. Además, la presencia de otras grietas es consistente con la fatiga; las demás grietas no tuvieron tiempo de crecer hasta un tamaño que produjera la falla catastrófica. Es posible que el examen de la superficie de la fractura revele marcas de playa o estriaciones por fatiga.

Un método convencional y el más antiguo para medir la resistencia de un material a la fatiga es el **ensayo de viga rotatoria en voladizo** (Fig. 6-49). Un extremo de un espécimen cilíndrico, maquinado, se monta en unas mordazas accionadas por un motor. Del extremo opuesto se cuelga una masa. Al principio, el espécimen manifiesta una fuerza de tensión que actúa sobre la superficie superior, mientras que la superficie inferior está a compresión. Después de que el espécimen gira 90° , los lugares que originalmente estaban en tensión y en compresión no están sometidos a esfuerzo alguno. Después de media vuelta, a los 180° , el material que originalmente estaba en tensión, ahora está en compresión, y viceversa. Así, el esfuerzo en cualquier punto pasa por un ciclo senoidal completo, desde el esfuerzo máximo de tensión hasta el esfuerzo máximo de compresión. El esfuerzo máximo que actúa sobre estos especímenes es

$$\pm \sigma = \frac{32 M}{\pi d^3} \quad (6-31a)$$

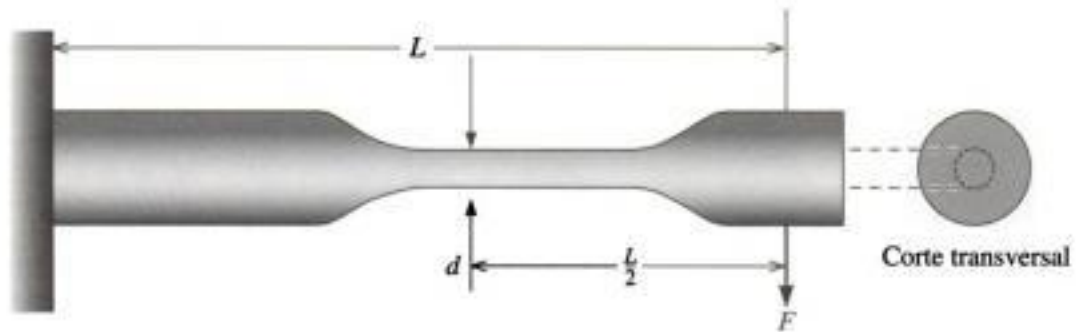


Figura 6-49 Esquema del ensayo de fatiga con el espécimen de viga giratoria en voladizo.

En esta ecuación, M es el momento de flexión en la sección transversal y d es el diámetro del espécimen. El momento flexionante es $M = F \cdot (L/2)$ y, en consecuencia,

$$\pm \sigma = \frac{16 FL}{\pi d^3} = 5.09 \frac{FL}{d^3} \quad (6-31b)$$

donde L es la distancia entre el punto de la fuerza de flexión y el soporte (figura 6-49), F es la carga y d es el diámetro.

Los nuevos aparatos para ensayos de fatiga se llaman máquinas de carga directa. En ellas, un sistema servohidráulico, un actuador y un sistema de control, todos ellos dirigidos por computadoras, aplica la fuerza, deflexión, desplazamiento o deformación que se desee. En algunas de esas máquinas, también se pueden controlar la temperatura y la atmósfera; es decir, el grado de humedad.

Después de una cantidad suficiente de ciclos en el ensayo de fatiga, el espécimen puede fallar. En general, se ensaya una serie de especímenes con distintos esfuerzos aplicados. Los resultados se presentan en forma de **curva S-N**, que también se llama **curva de Wöhler**, en donde se grafica el esfuerzo (S) en función de la cantidad de ciclos (N) a la falla (Fig. 6-50).

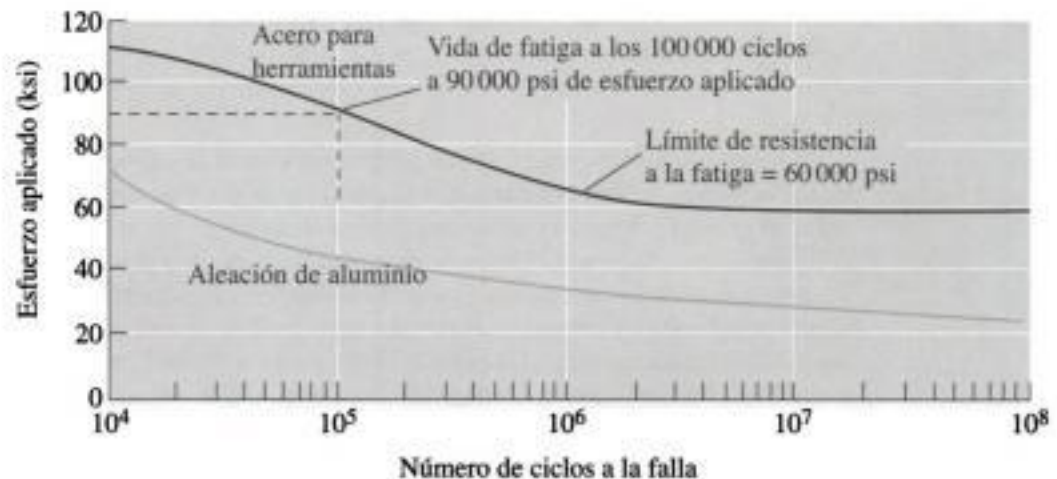


Figura 6-50 Curvas S-N, o de esfuerzo-cantidad de ciclos a la falla, para un acero herramienta y una aleación de aluminio.

El ensayo de fatiga puede indicar cuánto puede durar una parte o las cargas máximas que se pueden aplicar para evitar la falla. El **límite de resistencia a la fatiga** (o simplemente **límite de fatiga**), que es el esfuerzo por debajo del cual hay una probabilidad de 50% de que nunca haya una falla por fatiga, es el criterio de diseño que más se prefiere. Para evitar que falle una parte de acero para herramientas (Fig. 6-50), es necesario asegurarse de que el esfuerzo aplicado sea menor que 60 000 psi. La hipótesis de que existe un límite de fatiga es un concepto relativamente antiguo. Las investigaciones recientes en muchos metales han demostrado que es posible que no exista un límite de fatiga. También se debe tener en cuenta la presencia de corrosión, las sobrecargas ocasionales y otros mecanismos que puedan causar la falla del material abajo del límite de fatiga. Por lo mismo, se deben manejar con precaución los valores del límite de fatiga.

La **vida de fatiga** indica cuánto tiempo sobrevive un componente con determinado esfuerzo. Por ejemplo, si el acero para herramientas (Fig. 6-50) se somete en forma cíclica a un esfuerzo aplicado de 90 000 psi, la vida de fatiga será de 100 000 ciclos. Conociendo el tiempo asociado a cada ciclo, se puede calcular en años la vida de fatiga. La **resistencia a la fatiga** es el esfuerzo máximo para el cual no habrá falla por fatiga dentro de determinada cantidad de ciclos, por ejemplo 500 000 000 de ciclos. La resistencia a la fatiga es necesaria en el diseño de partes de aluminio o de polímeros, que no tienen límite de fatiga.

En algunos materiales, incluyendo los aceros, el límite de fatiga es, aproximadamente, la mitad de la resistencia a la tensión. La proporción entre ambos es la **relación de fatiga**:

$$\text{Relación de fatiga} = \frac{\text{límite de fatiga}}{\text{resistencia a la tensión}} \approx 0.5 \quad (6-32)$$

La relación de fatiga permite estimar las propiedades de fatiga mediante un ensayo de tensión. Los valores de esa relación son ~0.3 a 0.4 para los materiales metálicos que no sean aceros de baja y mediana resistencia. *De nuevo, recuérdese la nota precautoria que indica que no existe el límite de fatiga para muchos materiales.*

La mayoría de los materiales son **sensibles a muescas**, y las propiedades de fatiga dependen mucho de las imperfecciones que haya en la superficie. Los defectos de diseño o de manufactura causan concentraciones de esfuerzos y reducen el límite de fatiga, la resistencia a la fatiga o la vida de fatiga. A veces se preparan superficies muy lisas, para reducir al mínimo la posibilidad de que haya una falla por fatiga. El **granallado** también es un proceso muy eficaz para aumentar la vida de fatiga de los materiales. Se disparan esferas metálicas pequeñas contra el componente. Esto causa un esfuerzo residual de compresión en la superficie, parecido al **templado de los vidrios** inorgánicos, que se describirá después en este capítulo.

EJEMPLO 6-18 Diseño de una flecha de transmisión

Con el acero para herramientas de la figura 6-50, se fabrica una flecha o eje de transmisión para un horno de cemento, que debe ser de 96 pulgadas de largo y debe durar un año en funcionamiento continuo con una carga aplicada de 12 500 lb. La flecha hace una revolución por minuto durante el servicio. Diseñe un eje que satisfaga estos requisitos.

SOLUCIÓN

La vida de fatiga necesaria para nuestro diseño es la cantidad total de ciclos N que tendrá la flecha en un año:

$$N = (1/\text{ciclo}/\text{min})(60 \text{ min}/\text{h})(24 \text{ h}/\text{d})(365 \text{ d}/\text{a})$$

$$N = 5.256 \times 10^5 \text{ ciclos/año}$$

siendo $a = \text{año}$, $d = \text{día}$ y $h = \text{hora}$.

En la figura 6-50 se observa que el esfuerzo aplicado debe ser, en consecuencia, menor que 72 000 psi. Si se aplica la ecuación 6-31, el diámetro del eje debe ser:

$$\pm \sigma = \frac{16 FL}{\pi d^3} = 5.09 \frac{FL}{d^3}$$

$$72\,000 \text{ psi} = \frac{(5.09)(96 \text{ pulg})(12\,500 \text{ lb})}{d^3}$$

$$d = 4.39 \text{ pulg}$$

Bajo estas condiciones, un eje con 4.39 pulg de diámetro debe funcionar durante un año. Sin embargo, se podría incorporar un margen de seguridad apreciable en el diseño. Además, se debe tratar de producir una flecha que nunca falle.

Supongamos que el factor de seguridad sea 2; es decir, que el valor permitido del esfuerzo debe ser $72\,000/2 = 36\,000$ psi. El diámetro mínimo necesario para evitar la falla sería entonces:

$$36\,000 \text{ psi} = \frac{(5.09)(96 \text{ pulg})(12\,500 \text{ lb})}{d^3}$$

$$d = 5.53 \text{ pulg}$$

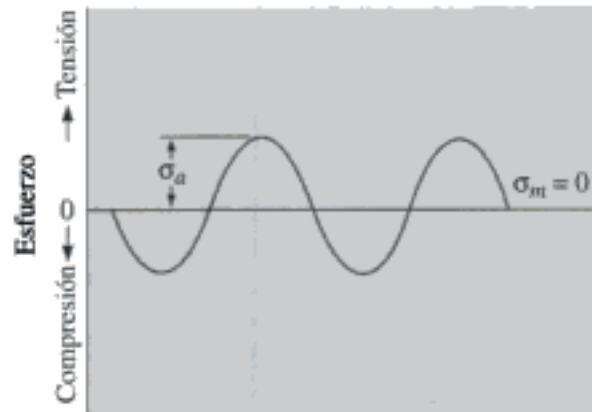
Si se selecciona la flecha más grande, se reduce el nivel de esfuerzo y es menos probable que se presente la fatiga, o tal vez se retarde. Naturalmente, se deben tener en cuenta otras cosas que podrían ser importantes. Las temperaturas elevadas y las condiciones corrosivas son inherentes a la producción del cemento. Si la flecha se calienta o ataca debido al ambiente corrosivo, se acelera la fatiga. Así, en las aplicaciones donde interviene la fatiga de los componentes, las inspecciones periódicas de los mismos contribuyen muy sensiblemente a evitar una falla catastrófica.

6-17 Aplicación de los ensayos de fatiga

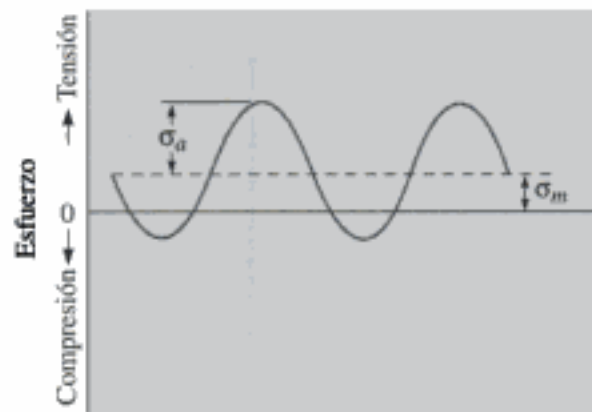
Con frecuencia, los materiales de los componentes se someten a condiciones que no producen esfuerzos iguales en tensión y compresión (Fig. 6-51). Por ejemplo, el esfuerzo máximo durante la compresión puede ser menor que durante la tensión. En otros casos, la carga podrá estar entre un esfuerzo máximo y mínimo de tensión; en estos casos, la curva S-N se presenta como amplitud de esfuerzo en función de la cantidad de ciclos a la falla. La *amplitud del esfuerzo* (σ_a) se define como la mitad de la diferencia entre los esfuerzos máximo y mínimo; es *esfuerzo promedio* (σ_m) se define como el promedio de los esfuerzos máximo y mínimo:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}}{2} \quad (6-33)$$

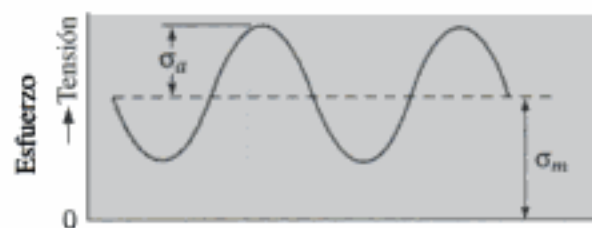
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}}{2} \quad (6-34)$$



(a)



(b)



(c)

Figura 6-51

Ejemplos de ciclos de esfuerzo.

(a) Esfuerzo igual en tensión y compresión. (b) Mayor esfuerzo de tensión que de compresión y (c) todo el esfuerzo es de tensión.

Un esfuerzo de compresión se considera "negativo". Así, si el esfuerzo máximo de tensión es 50 000 psi y el esfuerzo mínimo es de 10 000 psi en compresión, al usar las ecuaciones 6-33 y 6-34 se encuentra que la amplitud de esfuerzo es 30 000 psi y que el esfuerzo promedio es 20 000 psi.

A medida que aumenta el esfuerzo promedio, debe disminuir la amplitud de esfuerzo, para que el material resista los esfuerzos aplicados. Esta condición se puede resumir con la ecuación de Goodman:

$$\sigma_a = \sigma_f \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{TS}} \right) \right] \quad (6-35)$$

donde σ_f es la resistencia deseada a la fatiga para esfuerzo promedio cero, y σ_{TS} es la resistencia del material a la tensión. Así, en un ensayo normal de fatiga con viga en voladizo, en

la que el esfuerzo promedio es cero, se puede tolerar una amplitud de esfuerzo relativamente grande, sin que haya fatiga. Sin embargo, si el ala de un avión es cargada cerca de su resistencia de cedencia, hasta las vibraciones de amplitud pequeña pueden causar el inicio y el crecimiento de una grieta de fatiga.

Velocidad de crecimiento de una grieta En muchos casos, puede ser que un componente no esté en peligro de fallar, aunque exista una grieta. Para estimar cuándo podría ocurrir la falla, es importante la velocidad de propagación de la misma. La figura 6-52 muestra la rapidez de crecimiento de grieta en función del intervalo del factor de intensidad de esfuerzo, ΔK , que caracteriza la geometría de la grieta y la amplitud del esfuerzo. Abajo de un ΔK umbral, no crece una grieta; para intensidades de esfuerzo un poco mayores, las grietas crecen con lentitud; a intensidades de esfuerzo todavía mayores, una grieta crece con una velocidad determinada por:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (6.36)$$

En esta ecuación, C y n son constantes empíricas que dependen del material. Por último, cuando ΔK es todavía mayor, las grietas crecen con rapidez y en forma inestable, hasta que sobreviene la fractura.

La velocidad de crecimiento de grieta aumenta a medida que aumenta el tamaño de la misma, tal como lo indica el factor de intensidad de esfuerzo (ecuación 6-18):

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = f\sigma_{\max}\sqrt{\pi a} - f\sigma_{\min}\sqrt{\pi a} = f\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (6.37)$$

Si no cambia el esfuerzo cíclico $\Delta\sigma(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$, entonces, al aumentar la longitud a de la grieta, aumentan ΔK y la rapidez de crecimiento de grieta da/dN . Sin embargo, según esta ecuación, se debe notar que una grieta no se propaga durante la compresión. En consecuencia, si $\sigma_{\min}$ es de compresión, o menor que cero, se debe igualar a cero.

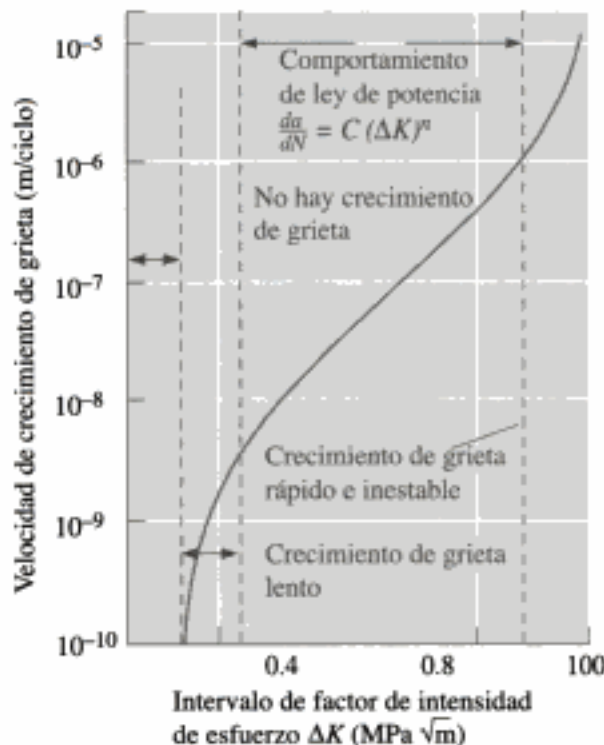


Figura 6-52
Velocidad de crecimiento de grieta en función del intervalo de factor de intensidad de esfuerzo para un acero de alta resistencia. Para este acero, $C = 1.62 \times 10^{-12}$ y $n = 3.2$, con las unidades indicadas.

El conocimiento de la velocidad de crecimiento de grieta ayuda a diseñar componentes y en la evaluación no destructiva, para determinar si una grieta significa un peligro inmediato para la estructura. Un método para atacar este problema es estimar la cantidad de ciclos necesarios para que suceda la falla. Reordenando la ecuación 6-36 y sustituyendo ΔK :

$$dN = \frac{1}{Cf^n \Delta \sigma^n \pi^{n/2}} \frac{da}{a^{n/2}}$$

Si se integra esta ecuación entre el tamaño inicial de la grieta y el tamaño necesario para que haya fractura, se encuentra que

$$N = \frac{2[(a_c)^{(2-n)/2} - (a_i)^{(2-n)/2}]}{(2-n) C f^n \Delta \sigma^n \pi^{n/2}} \quad (6.38)$$

en donde a_i es el tamaño inicial de la imperfección y a_c es el tamaño necesario para que haya fractura. Si se conocen las constantes n y C del material, en la ecuación 6-36, se puede estimar la cantidad de ciclos necesarios para la falla para un esfuerzo cíclico dado (ejemplo 6-19).

EJEMPLO 6-19 Diseño de una placa resistente a la fatiga

Una placa de acero de alta resistencia (Fig. 6-52) tiene una tenacidad a la fractura en deformación plana de $80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, y se carga alternativamente a 500 MPa a tensión y 60 MPa a compresión. La placa debe durar 10 años, y el esfuerzo se aplica con una frecuencia de una vez cada cinco minutos. Diseñe un procedimiento de manufactura y de prueba que asegure que el componente funcione como debe ser.

SOLUCIÓN

Para diseñar las posibilidades de manufactura y de ensayo se debe determinar el tamaño máximo de las imperfecciones que podrían causar la falla dentro del periodo de 10 años. El tamaño crítico de grieta (a_c), de acuerdo con la tenacidad a la fractura y el esfuerzo máximo, es:

$$\begin{aligned} K_{Ic} &= f\sigma\sqrt{\pi a_c} \\ 80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} &= (1)(500 \text{ MPa})\sqrt{\pi a_c} \\ a_c &= 0.0081 \text{ m} = 8.1 \text{ mm} \end{aligned}$$

El esfuerzo máximo es 500 MPa; sin embargo, el esfuerzo mínimo es cero y no 60 MPa de compresión, porque las grietas no se propagan en compresión. Así, $\Delta \sigma$ es:

$$\Delta \sigma = \sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}} = 500 - 0 = 500 \text{ MPa}$$

Se debe calcular la cantidad mínima de ciclos que debe resistir la placa:

$$\begin{aligned} N &= (1 \text{ ciclo}/5 \text{ min})(60 \text{ min}/\text{h})(24 \text{ h}/\text{d})(365 \text{ d}/\text{a})(10 \text{ a}) \\ N &= 1\,051\,200 \text{ ciclos} \end{aligned}$$

Si se supone que $f = 1$ para todas las longitudes de grieta y se observa que $C = 1.62 \times 10^{-12}$ y $n = 3.2$ en la ecuación 6-38, entonces:

$$1\,051\,200 = \frac{2[(0.008)^{(2-3.2)/2} - (a_i)^{(2-3.2)/2}]}{(2-3.2)(1.62 \times 10^{-12})(1)^{3.2}(500)^{3.2}\pi^{3.2/2}}$$

$$1\,051\,200 = \frac{2[18 - a_i^{-0.6}]}{(-1.2)(1.62 \times 10^{-12})(1)(4.332 \times 10^8)(6.244)}$$

$$a_i^{-0.6} = 18 + 2764 = 2782$$

$$a_i = 1.82 \times 10^{-6} \text{ m} = 0.00182 \text{ mm para grietas superficiales}$$

$$2a_i = 0.00364 \text{ mm para grietas internas}$$

El proceso de manufactura debe producir grietas de menos de 0.00182 mm de longitud. Se pueden hacer cálculos parecidos para especificar el límite para las grietas superficiales. Además, se debe disponer de las pruebas no destructivas que aseguren que no haya grietas mayores que esta longitud.

Efecto de la temperatura Al aumentar la temperatura del material, disminuyen tanto la vida de fatiga como el límite de resistencia a la fatiga. Además, un cambio cíclico de temperatura favorece la falla por fatiga térmica; cuando el material se calienta de manera no uniforme, algunas partes de la estructura se dilatan más que otras. Esta expansión no uniforme introduce un esfuerzo dentro del material, y cuando después la estructura se enfría y se contrae, se aplican esfuerzos de signos contrarios. Como consecuencia de los esfuerzos y las deformaciones inducidos térmicamente, puede presentarse la fatiga. La frecuencia con que se aplica el esfuerzo también influye sobre el comportamiento de la fatiga. En especial, los esfuerzos de alta frecuencia pueden causar calentamientos en los materiales poliméricos; a mayor temperatura, éstos fallan con más rapidez. También se deben tener en cuenta los efectos químicos de la temperatura (por ejemplo, la oxidación).

6-18 Termofluencia, ruptura por esfuerzo y corrosión bajo esfuerzos

Si se aplica esfuerzo a un material a alta temperatura, ese material se estirará y acabará por fallar, aun cuando el esfuerzo aplicado sea *menor* que la resistencia de cedencia a esa temperatura. Una deformación permanente que depende del tiempo, bajo una carga o un esfuerzo constante y a altas temperaturas, se llama **termofluencia** o simplemente **fluencia**. Una gran cantidad de fallas que suceden en partes que se usen a altas temperaturas se puede atribuir a la termofluencia o a una combinación de fluencia y fatiga. En esencia, en la termofluencia el material comienza a “fluir” con lentitud. La difusión, deslizamiento y ascenso de dislocaciones o el deslizamiento entre límites de grano puede contribuir a la termofluencia en materiales metálicos. Los materiales poliméricos también muestran esta termofluencia. En los metales y aleaciones dúctiles sometidos a termofluencia, la fractura se acompaña de formación de cuello, nucleación y coalescencia de huecos o por deslizamiento en límites de grano (Fig. 6-53).

Se considera que un material falló por termofluencia aunque en realidad *no* se haya fracturado. Cuando un material fluye y después se rompe finalmente, se define a la fractura como **ruptura por esfuerzo**. Normalmente, las fracturas de ruptura dúctil por esfuerzo incluyen un cuello y la presencia de muchas grietas que no tuvieron oportunidad de producir la fractura final. Además, los granos cerca de la superficie de fractura tienden a ser alargados. Las fallas por ruptura dúctil suceden en general cuando la velocidad de fluencia es alta, la temperatura de exposición es relativamente baja y tienen tiempos de ruptura cortos. Las fallas de ruptura frágil generalmente muestran poca formación de cuello y con frecuencia ocurren más a bajas velocidades de fluencia y altas temperaturas. Cerca de la superficie aparecen granos equiaxiales. Las fallas de ruptura frágil por esfuerzos suelen presentarse con la formación de huecos en la intersección de tres límites de grano y la incidencia de otros huecos a lo largo de los límites de grano por procesos de difusión (Fig. 6-54).

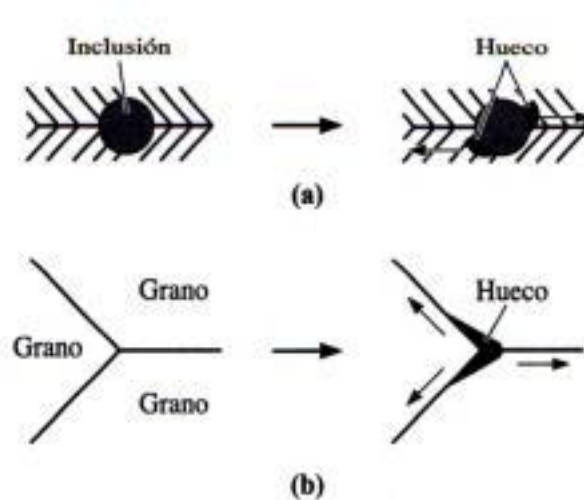


Figura 6-53

Deslizamiento de límites de grano durante la termofluencia; causa (a) la formación de huecos en una inclusión atrapada en el límite de grano y (b) la creación de un hueco en un punto triple, donde hay tres granos en contacto.

Corrosión bajo esfuerzos La **corrosión bajo esfuerzos** o **tensocorrosión** es un fenómeno en el cual los materiales reaccionan con sustancias corrosivas del ambiente. Eso conduce a la formación de grietas y a la disminución de la resistencia. La corrosión bajo esfuerzos puede presentarse con esfuerzos mucho menores que la resistencia a la cedencia del metal, cerámico o vítreo, debido al ataque por un medio corrosivo. En los materiales metálicos se producen grietas de corrosión profundas y finas, aun cuando el metal en su totalidad muestre poco ataque uniforme. Los esfuerzos pueden estar aplicados externamente o almacenados como esfuerzos residuales. Con frecuencia, las fallas por corrosión bajo esfuerzos se identifican por examen microestructural del metal vecino. En el caso ordinario, se observa una extensa ramificación de las grietas a lo largo de los límites de grano (Fig. 6-55). El lugar en el que se inician las grietas puede identificarse por la presencia de un producto de corrosión.

Los vidrios inorgánicos de silicato son muy propensos a fallar por reacción con el vapor de agua. Se sabe bien que la resistencia de los productos con fibras de sílice o con vidrio de sílice es muy alta, cuando esos materiales se protegen del vapor de agua. Cuando las partes de vidrio o de fibra de sílice se exponen al vapor de agua, comienzan reacciones de corrosión, que llevan a la formación de imperfecciones superficiales y, en último término, causan el crecimiento de las grietas cuando se aplica el esfuerzo. Como se describió en el capítulo 5, se aplican recubrimientos poliméricos a las fibras ópticas para evitar que reaccionen con el vapor de agua. Para los productos de vidrio, se usan tratamientos térmicos especiales, como el templado. El templado produce un esfuerzo compresivo sobre toda la superficie del vidrio.

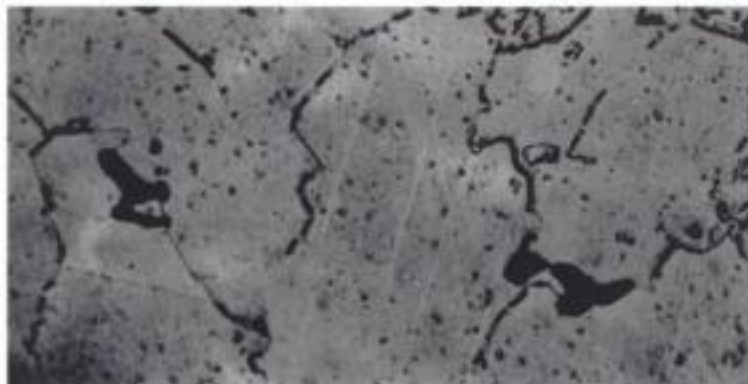


Figura 6-54 Cavidades de termofluencia que se forman en los límites de grano de un acero inoxidable austenítico (500 x). (De ASM Handbook, vol. 7 (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073.)

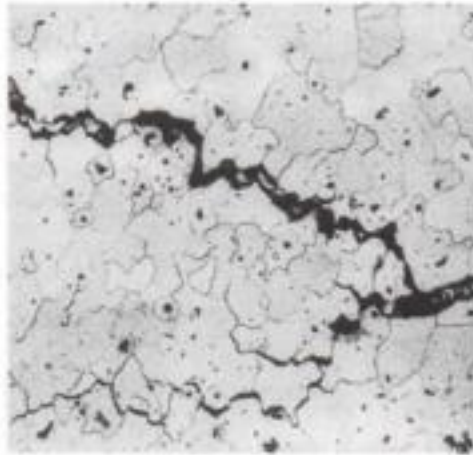


Figura 6-55 Fotomicrografía del metal cercano a una fractura de corrosión bajo esfuerzo, mostrando las numerosas grietas intergranulares que se forman a causa del proceso de corrosión (200 $\times$). (De ASM Handbook, Vol. 7 (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073.)

Así, aun cuando la superficie del vidrio reaccione con vapor de agua, las grietas no crecen, ya que el esfuerzo total en su superficie es de compresión. Si se produce una grieta que atraviese la región superficial de esfuerzo de compresión, el vidrio templado se estrellará. El vidrio templado se usa en los automóviles y los edificios.

EJEMPLO 6-20 *Análisis de la falla de un tubo*

Un tubo de titanio usado para transportar un material corrosivo a 400 °C falló después de varios meses. ¿Cómo se determinaría la causa de la falla?

SOLUCIÓN

Ya que se necesitó algún tiempo a alta temperatura para causar la falla, de lo primero que se debe sospechar es de un mecanismo de falla por termofluencia o por corrosión bajo esfuerzo. Se aconsejaría hacer un examen microscópico del material cercano a la superficie de fractura. Si se encuentran muchas grietas diminutas y ramificadas que se alejan de la superficie, una gran posibilidad es la corrosión por esfuerzo. Sin embargo, si los granos cercanos a la superficie de la fractura son alargados y hay entre ellos muchos huecos, causa de la falla más probable es la termofluencia.

6-19 Evaluación del comportamiento de termofluencia

Para determinar las características de termofluencia de un material, se aplica un esfuerzo constante a un espécimen calentado a cierta temperatura, en un **ensayo de termofluencia**. Tan pronto como se aplica el esfuerzo, el espécimen se estira en forma elástica una pequeña cantidad ϵ_0 (Fig. 6-56), dependiendo del esfuerzo aplicado y del módulo de elasticidad del material a esa alta temperatura. También se pueden hacer ensayos de termofluencia con carga constante, lo cual es importante desde el punto de vista de diseño de ingeniería.

Ascenso de dislocaciones Las temperaturas altas permiten que las dislocaciones **asciendan** en un metal, en consecuencia, los átomos se mueven por difusión hacia o desde la línea de dislocación, haciendo que la dislocación se mueva en una dirección perpendicular, no paralela, al plano de deslizamiento (Fig. 6-57). La dislocación escapa de las imperfecciones de la red, continúa deslizándose y causa deformación adicional del espécimen, incluso en un esfuerzo bajo.



Figura 6-56
Curva típica de termofluencia que muestra la deformación producida en función del tiempo para un esfuerzo y una temperatura constantes.

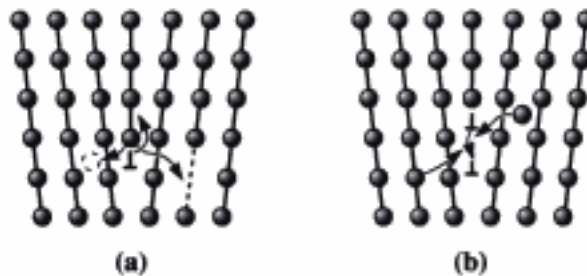


Figura 6-57
Las dislocaciones pueden ascender (a) cuando los átomos dejan la línea de dislocación y crean intersticios o llenan vacancias o (b) cuando los átomos se fijan a la línea de dislocación creando vacancias o eliminando intersticios.

Velocidad de termofluencia y tiempos de ruptura Durante el ensayo de termofluencia, se mide la deformación unitaria en función del tiempo y se grafica la curva de termofluencia (Fig. 6-56). En la primera etapa de la termofluencia de los metales, muchas dislocaciones suben alejándose de los obstáculos, se deslizan y contribuyen a la deformación. Al final, la rapidez con que las dislocaciones suben alejándose de los obstáculos es igual a la rapidez con la que otras imperfecciones bloquean a las dislocaciones. Esto causa la segunda etapa de la termofluencia, o termofluencia de estado estacionario. La pendiente de la región en estado estacionario de la curva de termofluencia es la **velocidad de termofluencia**:

$$\text{Velocidad de termofluencia} = \frac{\Delta \text{ deformación}}{\Delta \text{ tiempo}} \quad (6-39)$$

Finalmente, durante la tercera etapa de termofluencia, comienza la formación de cuello, aumenta el esfuerzo y el espécimen se deforma con una rapidez acelerada, hasta que se presenta la falla. El tiempo necesario para que se presente la falla es el **tiempo de ruptura**. El tiempo de ruptura se reduce a mayor esfuerzo o a mayor temperatura (Fig. 6-58).

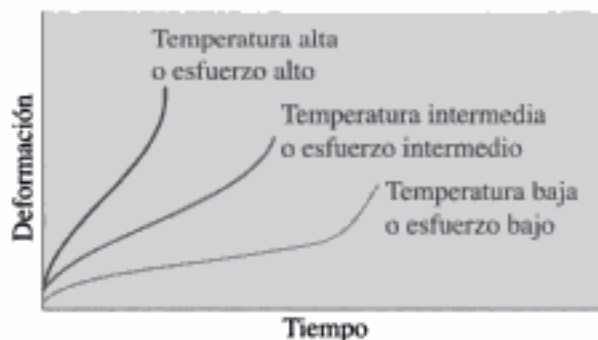


Figura 6-58
Efecto de la temperatura o el esfuerzo aplicado sobre la curva de termofluencia.

La influencia combinada del esfuerzo aplicado y de la temperatura sobre la velocidad de termofluencia y el tiempo de ruptura (t_r) se rigen por una relación de Arrhenius:

$$\text{Velocidad de termofluencia} = C\sigma^n \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \quad (6-40)$$

$$t_r = K\sigma^m \exp\left(\frac{Q_r}{RT}\right) \quad (6-41)$$

donde R es la constante de los gases, T es la temperatura en kelvins, y C , K , n y m son constantes del material. Q_c es la energía de activación para la termofluencia y Q_r es la energía de activación para la ruptura. En particular, Q_c se relaciona con la energía de activación para la autodifusión, cuando es importante el ascenso de dislocaciones.

En los cerámicos cristalinos hay otros factores, que incluyen deslizamiento de límites de grano y nucleación de microgrietas, que tienen especial importancia. Con frecuencia, está presente un material no cristalino o vítreo en los límites de grano; la energía de activación requerida para que se deforme el vidrio es baja y causa grandes velocidades de termofluencia, en comparación con los cerámicos totalmente cristalinos. Por esta misma razón, la termofluencia es rápida en los vitrocerámicos y en los polímeros amorfos.

6-20 Uso de datos de termofluencia

Las **curvas de esfuerzo contra ruptura** que se muestran en la figura 6-59(a) describen la duración esperada de un componente para determinada combinación de esfuerzo y temperatura. El **parámetro de Larson-Miller**, que se ilustra en la figura 6-59(b), se usa para consolidar la relación entre esfuerzo, temperatura y tiempo de ruptura en una sola curva. El parámetro LM (de Larson-Miller) es:

$$LM = \left(\frac{T}{1000}\right)(A + B \ln t) \quad (6-42)$$

donde T es en grados Kelvin, t es tiempo en horas, y A y B son constantes para el material.

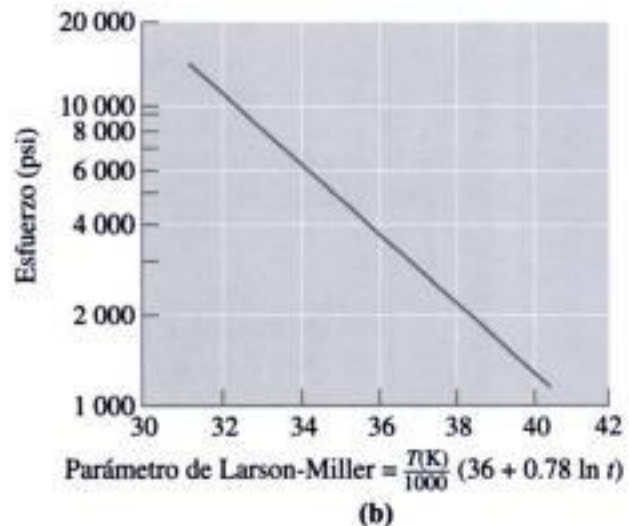
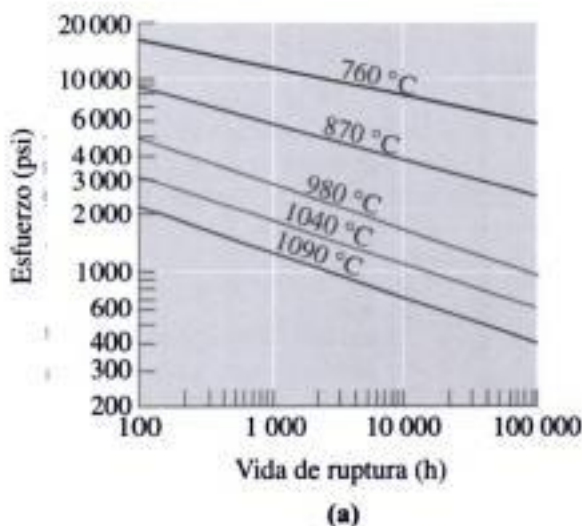


Figura 6-59 Resultados de una serie de ensayos de termofluencia. (a) Curvas de esfuerzo y ruptura para una aleación de hierro, cromo y níquel y (b) el parámetro de Larson-Miller para hierro colado dúctil.

EJEMPLO 6-21 Diseño de eslabones para una cadena

Diseñe una cadena de hierro colado dúctil (Fig. 6-60) que funcione en un horno para coccionar ladrillos de cerámica. La cadena debe trabajar sin romperse durante cinco años a 600 °C, con una carga aplicada de 5000 lb.

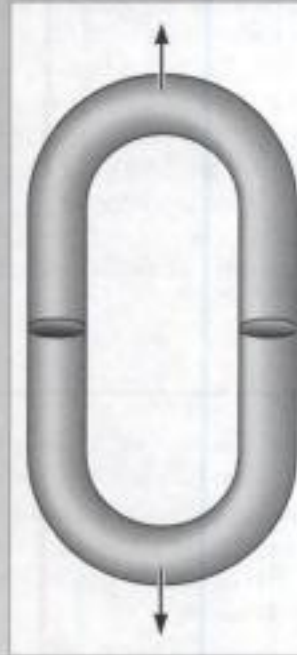


Figura 6-60 Esquema de un eslabón de cadena (para el ejemplo 6-21).

SOLUCIÓN

El parámetro de Larson-Miller para el hierro colado dúctil es:

$$L.M. = \frac{T(36 + 0.78 \ln t)}{1000}$$

La cadena debe durar cinco años, entonces:

$$t = (24 \text{ h/d})(365 \text{ d/a})(5 \text{ a}) = 43\,800 \text{ h}$$

$$L.M. = \frac{(600 + 273)[36 + 0.78 \ln(43\,800)]}{1000} = 38.7$$

De acuerdo con la figura 6-59(b), el esfuerzo aplicado no debe ser mayor que 2000 psi.

Supongamos un **factor de seguridad** de 2, y eso significará que el esfuerzo aplicado no debe ser mayor que $2000/2 = 1000$ psi.

El área transversal de la cadena necesaria para resistir la carga de 5000 lb es:

$$A = F/\sigma = \frac{5000 \text{ lb}}{1000 \text{ psi}} = 5 \text{ pulg}^2$$

El área transversal de cada "mitad" del eslabón de la cadena es, entonces, 2.5 pulg² y si la sección transversal es circular:

$$d^2 = (4/\pi)A = (4/\pi)(2.5) = 3.18$$

$$d = 1.78 \text{ pulg}$$

6-21 Superplasticidad

Muchos materiales metálicos y cerámicos muestran deformaciones plásticas anormalmente altas bajo cargas de tensión, a altas temperaturas y pequeñas velocidades de deformación. La **superplasticidad** consiste en grandes deformaciones en los materiales, causadas por temperaturas altas y velocidades de deformación bajas. Es la respuesta mecánica de esos materiales a la velocidad de deformación aplicada lo que causa carencia de formación de cuello. Esto, a su vez, causa comportamiento superplástico.[15] En los cerámicos, un tamaño pequeño de grano y los deslizamientos en límites de grano pueden permitir el comportamiento superplástico. La zirconia policristalina tetragonal (TZP) y muchas otras cerámicas muestran una considerable deformación plástica (deformaciones hasta 500%) a altas temperaturas (~ 1200 a 1600 °C) y a pequeñas velocidades de deformación ($\sim 10^{-4}$ a 10^{-5} s $^{-1}$). Algunos materiales muestran plasticidad adicional como resultado de cambios en la estructura cristalina. A esto se le llama *plasticidad inducida por deformación* y su origen es distinto del de la superplasticidad.

RESUMEN

- El comportamiento mecánico de los materiales se describe con sus propiedades mecánicas, que se miden con ensayos sencillos e idealizados. Esos ensayos tienen por objeto representar diversos tipos de condiciones de carga. Las propiedades de un material que aparecen en diversos manuales son el resultado de esos ensayos. En consecuencia, se debe recordar siempre que los valores de los manuales son resultados promedio obtenidos en ensayos idealizados y que se deben usar con cierto cuidado.
- El ensayo de tensión describe la resistencia de un material contra un esfuerzo aplicado lentamente. Entre las propiedades importantes están la resistencia de cedencia, que es el esfuerzo al cual el material comienza a deformarse permanentemente; la resistencia a la tensión, que es el esfuerzo correspondiente a la carga máxima aplicada; y el % de alargamiento (o elongación) y el % de reducción en área, ambos constituyen las medidas de la ductilidad del material.
- El ensayo de flexión se usa para determinar las propiedades de los materiales frágiles en tensión. Se pueden obtener un módulo de elasticidad y una resistencia a la flexión (similar a la resistencia a la tensión).
- En el ensayo de dureza se mide la resistencia de un material a la penetración, y proporciona una medida de la resistencia del material al desgaste y a la abrasión. Se acostumbra usar varios ensayos de dureza, entre ellos el de Rockwell y de Brinell. Con frecuencia, se puede relacionar la dureza con otras propiedades mecánicas, en particular con la resistencia a la tensión.
- El ensayo de impacto describe la respuesta de un material a una carga aplicada rápidamente o dinámica. Se usan los ensayos de Charpy e Izod. Se mide la energía que se requiere para fracturar el espécimen y se puede usar como base de comparación de diversos materiales ensayados bajo las mismas condiciones. Además, se puede determinar una temperatura de transición arriba de la cual el material falla en forma dúctil y no frágil.
- La tenacidad indica la capacidad que tienen los materiales de absorber energía antes de romperse. La tenacidad a la tensión es igual al área bajo la curva esfuerzo-deformación reales o ingenieriles. La tenacidad al impacto se mide con el ensayo de impacto. Ésta podría ser muy distinta de la tenacidad a la tensión. La tenacidad a la fractura describe la facilidad con que se propaga una grieta o imperfección en un material. La tenacidad a la fractura en deformación plana, K_{Ic} , es el resultado común en estos ensayos.

- Para describir y caracterizar la variabilidad de la resistencia de los materiales frágiles se usa el estadístico de Weibull. El módulo de Weibull es una medida de la variabilidad de la resistencia de un material.
- El ensayo de fatiga permite comprender cómo se desempeña un material cuando se le aplica un esfuerzo cíclico. El conocimiento de la velocidad de crecimiento de grietas puede ayudar a determinar la vida de fatiga.
- En el diseño de los componentes es importante tener en cuenta un factor de seguridad.
- El análisis microestructural de las superficies fracturadas puede permitir mejor comprensión del origen y la causa de la fractura. Diversas propiedades microestructurales están relacionadas con la fractura dúctil y frágil, así como con la falla por fatiga.
- El ensayo de termofluencia proporciona información sobre la capacidad de carga de un material a altas temperaturas. La velocidad de termofluencia y el tiempo de ruptura son propiedades importantes que se obtienen con estos ensayos.

GLOSARIO

Ascenso Movimiento de una dislocación en dirección a su plano de deslizamiento, debido a la difusión de los átomos hacia o desde la línea de dislocación.

Carga Fuerza aplicada a un material durante un ensayo.

Carga de impacto o dinámica Aplicación del esfuerzo con una velocidad de deformación muy alta ($\rightarrow 100 \text{ s}^{-1}$).

Comportamiento tixotrópico Materiales que presentan fluidez por cortante y también una viscosidad aparente que disminuye con el tiempo a velocidad constante de corte.

Corrosión bajo esfuerzo o tensocorrosión Fenómeno en el cual los materiales reaccionan con sustancias corrosivas del ambiente, lo cual causa la formación de grietas y la disminución de la resistencia.

Criterio deformación plástica convencional para determinar la resistencia a la cedencia Valor de la deformación unitaria (por ejemplo, 0.002 o 0.2%) que se usa para obtener el valor de la resistencia de cedencia.

Curva de esfuerzo contra ruptura Método de presentación de los resultados de una serie de pruebas de fluencia mediante el graficado del esfuerzo aplicado en función del tiempo de ruptura.

Curva de Wöhler Gráfica del esfuerzo de fatiga en función de la cantidad de ciclos (también se llama curva S-N).

Curva S-N (también curva de Wöhler) Gráfica que muestra el esfuerzo en función de la cantidad de ciclos para la fatiga.

Deformación elástica Deformación del material que desaparece en forma instantánea cuando se elimina la carga aplicada.

Deformación ingenieril La cantidad que se deforma un material por unidad de longitud en un ensayo de tensión.

Deformación plástica Deformación permanente de un material cuando se aplica una carga y después se elimina.

Deformación real Deformación calculada con las dimensiones reales, y no las originales; se define por $\epsilon_r = \ln(l/l_0)$.

Deformación unitaria Cambio de dimensión por unidad de longitud.

Deformación (unitaria) elástica Deformación restaurable en un material que se desarrolla en forma instantánea.

Delaminación u hoqueo Proceso por el que comienzan a despegarse distintas capas de un material compuesto.

Dilatante (espesor por cortante) Material cuya viscosidad aparente aumenta al aumentar la rapidez de esfuerzo cortante.

Distribución de Weibull Distribución matemática de las probabilidades de falla o supervivencia de un material en función del esfuerzo.

Ductilidad Capacidad de un material para deformarse permanentemente sin romperse cuando se le aplica una fuerza.

Elastómeros Plásticos naturales o sintéticos formados por moléculas con formas parecidas a resortes, los cuales permiten grandes deformaciones elásticas; por ejemplo, hule natural, siliconas.

Elongación porcentual Incremento porcentual total de la longitud de un espécimen durante un ensayo de tensión.

Energía de impacto Energía necesaria para romper un espécimen estándar cuando se aplica la carga en forma repentina.

Ensayo de dureza Mide la resistencia de un material a la penetración. Entre los ensayos frecuentes están el de Brinell, de Rockwell, de Knoop y de Vickers.

Ensayo de flexión Aplicación de una fuerza al centro de una barra soportada en cada extremo, para determinar la resistencia del material hacia una carga estática o aplicada lentamente. Normalmente se usa para materiales frágiles.

Ensayo de impacto Mide la capacidad de un material para absorber, sin romperse, la aplicación repentina de una carga. Los ensayos de Charpy y de Izod son los que más se usan para el impacto.

Ensayo de tensión Mide la respuesta de un material a una fuerza uniaxial aplicada lentamente. Se obtienen la resistencia de cedencia, resistencia a la tensión, módulo de elasticidad y ductilidad.

Ensayo de termofluencia Mide la resistencia de un material a la deformación y a la falla, cuando se le sujeta a una carga estática menor que la resistencia de cedencia a una temperatura elevada.

Ensayo de viga rotatoria en voladizo Prueba de fatiga que se hacía anteriormente.

Esfuerzo Fuerza o carga por unidad de área transversal sobre la que está actuando la fuerza o la carga.

Esfuerzo ingenieril La carga o fuerza aplicada, dividida entre la sección transversal original del material.

Esfuerzo real La carga dividida entre el área transversal real del espécimen con esa carga.

Espeso por cortante (dilatante) Material cuya viscosidad aparente aumenta al aumentar la velocidad cortante.

Estrías Figuras que se observan en una superficie fracturada de una muestra fatigada. Tienen una escala mucho menor que las marcas de playa y muestran la posición de la punta de la grieta después de cada ciclo.

Extensómetro Instrumento para medir el cambio de longitud de un espécimen en tensión, que permite así el cálculo de la deformación unitaria.

Factor de seguridad Relación de la magnitud del esfuerzo para el que está diseñado un componente, entre el valor real del esfuerzo a que está sometido. Es un factor que se usa para diseñar componentes que resisten cargas. Por ejemplo, si la cantidad mínima que un componente puede tomar es 10 000 psi y se diseña (es decir, se selecciona el material, su geometría, etcétera) de tal manera que pueda resistir una carga de 20 000 psi, en ese caso el factor de seguridad será 2.0.

Fatiga Mide la resistencia de un material a la falla, cuando se aplica en forma repetitiva un esfuerzo menor que la resistencia de cedencia.

Fenómeno de punto de cedencia (o fluencia) Transición abrupta, que se observa en algunos materiales, de la deformación elástica al flujo plástico.

Flexibilidad o capacidad elástica de deformación Inverso del módulo de Young o del módulo de elasticidad.

Fluido por cortante (seudoplástico) Material cuya viscosidad aparente disminuye al aumentar la velocidad cortante.

Formación de cuello o estricción Deformación local que causa una reducción en el área transversal de un espécimen a la tensión. Muchos materiales dúctiles muestran este comportamiento. El esfuerzo unitario comienza a disminuir al principio de la formación de cuello.

Fractura concoidal o en concha Superficie de fractura que contiene una zona especular muy lisa cerca del origen de la fractura, y líneas de rasgado en el resto de la superficie. Es característica de los materiales amorfos.

Galga de deformación (extensómetro) Dispositivo para medir el cambio de longitud, y con ella la deformación unitaria.

Granallado Proceso en el que se disparan esferas de metal hacia un componente. Esto causa un esfuerzo de compresión residual en la superficie del componente, que aumenta su vida de fatiga.

Imperfección de Griffith Grieta o imperfección en un material, que concentra y aumenta el esfuerzo aplicado.

Intergranular Entre los granos o a lo largo de los límites de grano.

Ley de Hooke Relación entre el esfuerzo y la deformación en la parte elástica de la curva esfuerzo-deformación.

Límite de proporcionalidad Valor del esfuerzo arriba del cual la relación entre esfuerzo y deformación unitaria no es lineal.

Límite de resistencia a la fatiga Concepto anticuado que definía al esfuerzo abajo del cual un material no falla en un ensayo de fatiga. Factores como la corrosión o las cargas ocasionales pueden hacer que los materiales fallen con esfuerzos menores que el supuesto límite de resistencia.

Límite elástico Magnitud del esfuerzo con el cual la relación entre esfuerzo y deformación unitaria comienza a apartarse de la linealidad.

Macro dureza Dureza general de los materiales, medida con cargas >2 N.

Marcas de playa Patrones que se presentan frecuentemente en piezas sujetas a la fatiga. Suelen formarse cuando cambia la carga durante el servicio o cuando la carga es intermitente, permitiendo quizás que haya tiempo para la oxidación dentro de la grieta.

Material anelástico (viscoelástico) Material cuya deformación total desarrollada tiene componentes elástico y viscoso. Parte de la deformación total desaparece en forma similar a la deformación elástica. Sin embargo, alguna parte requiere tiempo para desaparecer. Ejemplos de materiales viscoelásticos: polímeros fundidos, muchos polímeros, incluyendo la masilla Silly Putty®. Normalmente, el término anelástico se usa con los materiales metálicos.

Material viscoelástico (o anelástico) Véase Material anelástico.

Material viscoso Aquel cuya deformación se desarrolla durante un tiempo y el material no regresa a su forma original después de eliminar el esfuerzo.

Mecánica de la fractura Estudio de la capacidad de un material para resistir el esfuerzo en presencia de una imperfección.

Micro dureza Dureza de materiales que se suele medir con cargas menores que 2 N, con ensayos como el de Knoop (HK).

Microhuecos Desarrollo de agujeros pequeños en un material. Se forman cuando un gran esfuerzo causa la separación del metal en los límites de grano o interfaces entre el metal y las inclusiones.

Módulo de elasticidad cortante (G) Pendiente de la parte lineal de la curva de esfuerzo cortante-deformación unitaria cortante.

Módulo de elasticidad (E) Módulo de Young, o la pendiente de la parte lineal de la curva esfuerzo-deformación en la región elástica. Es una medida de la rigidez de un material; depende de la fuerza de los enlaces interatómicos y de la composición, y no depende mucho de la microestructura.

Módulo de flexión El módulo de elasticidad calculado con los resultados de un ensayo de flexión, que es igual a la pendiente de la curva esfuerzo-deflexión.

Módulo de Poisson Relación entre las deformaciones unitarias lateral y longitudinal en la región elástica.

Módulo de resiliencia (E_r) Energía elástica máxima absorbida por un material cuando se le aplica una carga.

Módulo de ruptura Esfuerzo necesario para romper un espécimen en un ensayo de flexión. También se llama resistencia a la tensión.

Módulo de Young Pendiente de la parte lineal de la curva esfuerzo-deformación en la región elástica. Es sinónimo de módulo de elasticidad.

Módulo de Weibull (m) Parámetro relacionado con la distribución de Weibull. Es un indicador de la variabilidad de la resistencia de los materiales debida a una distribución de tamaños de imperfecciones.

Nanodureza Dureza de los materiales medida a una escala de longitud de 1 a 10 nm, con fuerzas extremadamente pequeñas ($\sim 100 \mu\text{N}$).

Newtoniano Material en el que el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación por cortante tienen una relación lineal; por ejemplo, aceite delgado o agua.

No newtoniano Material en el que el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación por cortante no tienen una relación lineal; estos materiales pueden ser fluidos por cortante o espesos por cortante (por ejemplo, polímeros fundidos, lodos, pinturas, etcétera).

Parámetro de Larson-Miller Parámetro para relacionar el esfuerzo, la temperatura y el tiempo de ruptura en la termofluencia.

Patrón de Chevrón Propiedad común en las fracturas producidas por frentes separados de grieta que se propagan a distintos niveles en el material.

Plástico de Bingham Material cuya respuesta mecánica es $\tau = G\gamma$ cuando $\tau < \tau_y$, y $\tau = \tau_y + \eta\dot{\gamma}$, cuando $\tau \geq \tau_y$.

Procesamiento de materiales Métodos de manufactura o de fabricación para moldear los materiales (por ejemplo, extrusión y forja).

Reducción porcentual de área Porcentaje total de disminución del área transversal de un espécimen durante el ensayo de tensión.

Relación de resistencia a la fatiga El límite de resistencia a la fatiga dividido entre la resistencia a la tensión del material. La relación es aproximadamente igual a 0.5 para muchos materiales ferrosos. Véase la nota precautoria acerca del límite de resistencia a la fatiga.

Relajación de esfuerzo Disminución del esfuerzo en un material mantenido bajo deformación unitaria constante, en función del tiempo; se observa en materiales viscoelásticos. La relajación de esfuerzo es distinta de la recuperación, o desaparición, de la deformación en función del tiempo.

Reómetro Instrumento para medir las propiedades reológicas de un material, como viscosidad, resistencia de cedencia, comportamiento de adelgazamiento por cortante, etcétera.

Reopéctico Espesamiento por cortante y también una viscosidad aparente que aumenta con el tiempo, a una velocidad cortante constante.

Resistencia a la cedencia Valor obtenido gráficamente que no describe más que una cantidad convencional de deformación (por lo general 0.002).

Resistencia a la fatiga Esfuerzo requerido para causar falla por fatiga en determinada cantidad de ciclos; por ejemplo, 500 millones de ciclos.

Resistencia a la flexión Esfuerzo necesario para romper un espécimen en un ensayo de flexión. También se llama módulo de ruptura.

Resistencia a la tensión Esfuerzo que corresponde a la carga máxima en ensayo de tensión.

Resistencia de cedencia Valor de esfuerzo que se obtiene gráficamente y describe el esfuerzo que produce deformaciones plásticas menores que determinado valor especificado. Es muy útil para diseñar componentes.

Rigidez Medida cualitativa de la deformación elástica producida en un material. Un material rígido tiene un módulo de elasticidad grande. La rigidez también depende de la geometría.

Sensibilidad a la muesca Mide el efecto de una muesca, rayadura u otra imperfección sobre las propiedades de un material, como tenacidad o vida de fatiga.

Seudoplásticos (fluido por cortante) Materiales cuya viscosidad aparente disminuye al aumentar la velocidad cortante.

Superplasticidad Deformaciones grandes en los materiales, debidas a altas temperaturas y bajas velocidades de deformación.

Temperatura de transformación vítrea (T_g) Temperatura por debajo de la cual un material que, si por lo demás fuera dúctil, se comporta como frágil. Por lo general, esta temperatura no es fija y está influida por el procesamiento del material.

Temperatura de transición de dúctil a frágil (DBTT, por sus siglas en inglés) Temperatura abajo de la cual un material se comporta de forma frágil en un ensayo de impacto. El cambio de dúctil a frágil también depende de la velocidad de deformación.

Templado del vidrio Tratamiento térmico que hace más seguras las placas de vidrio, porque crea una capa de esfuerzo de compresión en la superficie.

Tenacidad Medida cualitativa de la energía necesaria para causar la ruptura de un material. Un material que resiste la falla por impacto es tenaz. Una medida de la tenacidad es el área bajo la curva esfuerzo real-deformación unitaria real (tenacidad a la tensión), otra es la energía de impacto medida durante un ensayo de impacto (tenacidad al impacto). La capacidad de los materiales que contienen imperfecciones para resistir las cargas se llama tenacidad a la fractura.

Tenacidad a la fractura Resistencia de un material a la falla en presencia de una imperfección.

Tenacidad a la tensión Área bajo la curva de ensayo esfuerzo real-deformación unitaria real; es una medida de la energía necesaria para causar la fractura bajo las condiciones del ensayo de tensión.

Tenacidad al impacto Energía absorbida por un material, por lo general con una muesca, durante la fractura y bajo las condiciones del ensayo de impacto.

Termofluencia Deformación dependiente del tiempo y permanente, a alta temperatura, que se presenta con carga constante o con esfuerzo constante.

Tiempo de ruptura Tiempo necesario para que falle un espécimen por termofluencia, a determinada temperatura y con determinado esfuerzo.

Trabajo de fractura. Área bajo la curva esfuerzo-deformación unitaria; se considera como medida de la tenacidad a la fractura.

Transgranular A través de los granos (por ejemplo, una fractura transgranular sería una en la que las grietas atravesarían los granos).

Velocidad de deformación Rapidez con que se desarrolla la deformación en, o se aplica a, un material; se representa por $\dot{\epsilon}$ o $\dot{\gamma}$, respectivamente, para las velocidades de deformación por tensión y por cortante. La velocidad de deformación puede tener un efecto sobre el comportamiento dúctil o frágil de un material.

Velocidad de deformación por cortante Derivada de la deformación unitaria por cortante respecto al tiempo. Véase "Velocidad de deformación".

Velocidad de termofluencia Rapidez con que un material se deforma cuando se le aplica un esfuerzo a alta temperatura.

Vida de fatiga Cantidad de ciclos permitidos a un determinado esfuerzo antes de que un material falle por fatiga.

Viscosidad (η) Medida de la resistencia al flujo; se define como la relación de esfuerzo cortante entre velocidad de deformación por cortante (con unidades de poise o de Pa-s).

Viscosidad aparente Viscosidad obtenida dividiendo el esfuerzo cortante entre el valor correspondiente de la rapidez de deformación unitaria cortante, para ese esfuerzo.

Viscosidad cinemática (μ) Relación de viscosidad entre densidad; con frecuencia se expresa en centistokes.

INFORMACIÓN ADICIONAL

1. VAUGHAN, D. "The Challenger Launch Decision: Risky Technology, Culture and Deviance at NASA", University of Chicago Press, 1996.
2. HILL, S. "The Mystery of the Titanic: A Case of Brittle Fracture?", *Materials World*, 4(6), 1996, pp. 334-335.
3. GANNON, R. "What Really Sank the Titanic", *Popular Science*, 246(2), 1995, pp. 49-55.
4. PIEHLER, H.R. *MRS Bulletin* 2000, 25(8), 2000, pp. 67-70.
5. PLAZEK, DONALD. Universidad de Pittsburgh, *Comunicación personal*, 2000.
6. HOOKE, R. *Ut Tensio sic Vis* (En latín. Al aumentar la tensión también lo hace la deformación), 1678.
7. LAKES, R. "Foam Structures with a Negative Poisson's Ratio", *Science*, 235, 1987, pp. 1038-1040.
8. NEWBY, C. y G. WEAVER. *Materials In Action Series-Materials Principles and Practice*, Butterworth-Heinemann, 1991.
9. COURTNEY, T.H. *Mechanical Behavior of Materials*, McGraw-Hill, 2000.
10. MEYERS, M. y CHAWLA, K.K. *Mechanical Behavior of Materials*, Prentice Hall, 1999.
11. BENGISU, M. *Engineering Ceramics*, Springer Verlag, 2001.
12. WEIBULL, W. *Appl. Mech.*, 18, 1951, p. 293.
13. DOWLING, N.E. *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*, 2a. ed., Upper Saddle River, Prentice Hall, 1999.
14. SURESH, S. *Fatigue of Materials*, Cambridge, R.U., Cambridge University Press, 1991.
15. CASTAING, J. y DOMÍNGUEZ-RODRÍGUEZ, A. "Ductility in Ceramics", en *The Encyclopedia of Advanced Materials*, D. BLOOR et al., Eds., 1994. pp. 659-664.



PROBLEMAS

Sección 6-1 Importancia tecnológica

- 6-1 Explique, con ejemplos reales, el papel de las propiedades mecánicas en aplicaciones sujetas a cargas dinámicas.

- 6-2 Explique la importancia de las propiedades mecánicas en aplicaciones funcionales (por ejemplo, ópticas, magnéticas, electrónicas, etc.), con ejemplos del mundo real.

- 6-3 Explique la importancia de comprender las propiedades mecánicas en el procesamiento de los materiales.

Sección 6-2 Terminología de las propiedades mecánicas

- 6-4 Defina "esfuerzo ingenieril" y "deformación ingenieril".
- 6-5 Defina "módulo de elasticidad".
- 6-6 Explique los términos "esfuerzo elástico" y "deformación elástica".
- 6-7 Defina "deformación plástica" y compárela con la "deformación elástica".
- 6-8 ¿Qué es velocidad de deformación? ¿Cómo afecta el comportamiento mecánico de los materiales poliméricos y metálicos?
- 6-9 ¿Por qué la masilla Silly Putty® se rompe cuando se estira con mucha rapidez?
- 6-10 ¿Qué es un material viscoelástico? Dé un ejemplo.
- 6-11 ¿Qué significa el término "relajación de esfuerzo"?
- 6-12 Defina los términos "viscosidad", "viscosidad aparente" y "viscosidad cinemática".
- 6-13 ¿Cuál es la viscosidad del agua y de los aceites delgados a temperatura ambiente en las unidades de Pa-s y de cP?
- 6-14 ¿Cuál es la viscosidad cinemática del agua a temperatura ambiente, en centistokes?
- 6-15 ¿Cuáles son las dos ecuaciones que describen el comportamiento pseudoplástico de Bingham?
- 6-16 ¿Qué es un material newtoniano? Dé un ejemplo.
- 6-17 ¿Qué es un elastómero? Dé un ejemplo.
- 6-18 ¿Qué significan los términos "fluido por cortante" y "espeso por cortante"?
- 6-19 Muchas pinturas y otras dispersiones no sólo son "fluidos por cortante", sino también tixotrópicos. ¿Qué significa el término "tixotropía"?
- 6-20 Trace un diagrama que muestre el desarrollo de la deformación en un material elástico y en uno viscoelástico. Suponga que se aplica la carga en cierto momento $t = 0$ y se retira en cierto tiempo t .

Sección 6-3 El ensayo de tensión: uso del diagrama esfuerzo-deformación unitaria

- 6-21 Trace las curvas cualitativas de esfuerzo ingenieril-deformación ingenieril para un polímero dúctil, un metal dúctil, una cerámica, un vidrio y el hule natural. Identifíquelas con cuidado. Explique su esquema para cada material.
- 6-22 ¿Qué es formación de cuello? ¿Cómo causa la reducción en el esfuerzo ingenieril a medida que el esfuerzo real aumenta?

- 6-23 ¿Por qué algunos polímeros se fortalecen al estirarlos más allá de la región donde se forma el cuello?
- 6-24 Se aplica una fuerza de 850 lb a un alambre de níquel de 0.15 pulg de diámetro, que tiene una resistencia de cedencia de 45 000 psi y una resistencia a la tensión de 55 000 psi. Determine
- si el alambre se deformará en forma plástica y
 - si el alambre tendrá formación de cuello.
- 6-25 Se aplica una fuerza de 100 000 N a una barra de hierro de 10 mm $\times$ 20 mm cuya resistencia de cedencia es de 400 MPa y su resistencia a la tensión de 480 MPa. Determine
- si la barra se deformará en forma plástica y
 - si se formará cuello.
- 6-26 Calcule la fuerza máxima que puede resistir una varilla de Al_2O_3 con una resistencia de cedencia de 35 000 psi sin deformación plástica. Exprese su respuesta en libras y en newtons.
- 6-27 Una fuerza de 20 000 N hace que una barra de magnesio de 1 cm $\times$ 1 cm se estire de 10 cm a 10.045 cm. Calcule el módulo de elasticidad, tanto en GPa como en psi.
- 6-28 Las dimensiones de una barra de polímero son 1 pulg $\times$ 2 pulg $\times$ 15 pulg. El polímero tiene un módulo de elasticidad de 600 000 psi. ¿Qué fuerza se requiere para estirla en forma elástica hasta 15.25 pulg?
- 6-29 Una placa de aluminio de 0.5 cm de espesor debe resistir una fuerza de 50 000 N sin deformarse en forma permanente. Si la resistencia de cedencia del aluminio es 125 MPa, ¿cuál es el ancho mínimo de la placa?
- 6-30 El diámetro de 3 pulg de una barra de cobre se debe reducir a 2 pulg, pasarla por una abertura. Para tener en cuenta la deformación elástica, ¿cuál debería ser el diámetro de la abertura? El módulo de elasticidad del cobre es 17×10^6 psi y la resistencia de cedencia es 40 000 psi. Una lámina de magnesio de 8 cm de ancho y 0.15 cm de espesor, que originalmente tiene 5 m de longitud, se debe estirar hasta una longitud final de 6.2 m. ¿Cuál debe ser la longitud de la lámina antes de suspender el esfuerzo aplicado? El módulo de elasticidad del magnesio es 45 GPa y su resistencia de cedencia es 200 MPa.
- 6-31 Un cable de acero tiene 1.25 pulg de diámetro y 50 pies de longitud, y con él se levanta una carga de 20 toneladas. ¿Cuál es la longitud del cable durante el izamiento? El módulo de elasticidad del acero es 30×10^6 psi.

Sección 6-4 Propiedades obtenidas en el ensayo de tensión y

Sección 6-5 Esfuerzo real y deformación real

- 6-32 Defina "esfuerzo real" y "deformación real". Compárelas con esfuerzo ingenieril y deformación ingenieril.

6-33 Escriba las fórmulas para calcular el esfuerzo y la deformación unitaria de una muestra sometida a un ensayo de tensión. Suponga que en la muestra se forma cuello.

6-34 Los datos siguientes se tomaron de un espécimen normal de 0.505 pulg de diámetro, de una aleación de cobre (longitud inicial $(l_0) = 2.0$ pulg):

Carga (lb)	$\Delta/$ (pulg)
0	0.0000
3 000	0.00167
6 000	0.00333
7 500	0.00417
9 000	0.0090
10 500	0.040
12 000	0.26
12 400	0.50 (carga máxima)
11 000	1.02 (fractura)

Después de la fractura, la longitud total fue 3.014 pulg y el diámetro fue 0.374 pulg. Grafique los datos y calcule la resistencia de cedencia con el criterio del 0.2% de deformación convencional y también

- la resistencia a la tensión,
- el módulo de elasticidad,
- el % de alargamiento,
- la reducción porcentual de área,
- el esfuerzo técnico o ingenieril a la fractura,
- el esfuerzo real a la fractura y
- el módulo de resiliencia.

6-35 Los datos siguientes se tomaron para un espécimen de 0.4 pulg de cloruro de polivinilo ($l_0 = 2.0$ pulg):

Carga (lb)	$\Delta/$ (pulg)
0	0.00000
300	0.00746
600	0.01496
900	0.02374
1200	0.032
1500	0.046
1660	0.070 (carga máxima)
1800	0.094
1420	0.12 (fractura)

Después de la fractura, la longitud total era 2.09 pulg y el diámetro fue 0.393 pulg. Grafique los datos y calcule

- la resistencia de cedencia con el criterio de 0.2% de deformación convencional,
- la resistencia a la tensión,
- el módulo de elasticidad,
- el % de alargamiento,
- el % de reducción de área,
- el esfuerzo ingenieril en la fractura,

- el esfuerzo real en la fractura y
- el módulo de resiliencia.

6-36 Los siguientes datos se tomaron con un espécimen de prueba de magnesio ($l_0 = 30.00$ mm):

Carga (N)	$\Delta/$ (mm)
0	0.0000
5 000	0.0296
10 000	0.0592
15 000	0.0888
20 000	0.15
25 000	0.51
26 500	0.90
27 000	1.50 (carga máxima)
26 500	2.10
25 000	2.79 (fractura)

Después de la fractura, la longitud total era 32.61 mm y el diámetro, 11.74 mm. Grafique los datos y calcule:

- la resistencia de cedencia con el criterio de 0.2% de deformación convencional,
- la resistencia a la tensión,
- el módulo de elasticidad,
- el % de alargamiento,
- el % de reducción de área,
- el esfuerzo ingenieril en la fractura,
- el esfuerzo real en la fractura y
- el módulo de resiliencia.

6-37 Los siguientes datos se tomaron con un espécimen de prueba de 20 mm de diámetro de un hierro colado dúctil ($l_0 = 40.00$ mm):

Carga (N)	$\Delta/$ (mm)
0	0.0000
25 000	0.0185
50 000	0.0370
75 000	0.0555
90 000	0.20
105 000	0.60
120 000	1.56
131 000	4.00 (carga máxima)
125 000	7.52 (fractura)

Después de la fractura, la longitud total era 47.42 mm, y el diámetro, 18.35 mm. Grafique los datos y calcule:

- la resistencia de cedencia con el criterio de 0.2% de deformación convencional,
- la resistencia a la tensión,
- el módulo de elasticidad,
- el % de alargamiento,
- el % de reducción de área,
- el esfuerzo ingenieril en la fractura,

- g) el esfuerzo real en la fractura y
h) el módulo de resiliencia.

Sección 6-6 El ensayo de flexión para materiales frágiles

- 6-38 Defina los términos "resistencia a la flexión" y "módulo de flexión".
- 6-39 ¿Por qué se hacen con frecuencia ensayos de flexión con materiales frágiles?
- 6-40 Una barra de Al_2O_3 de 0.25 pulg de grueso, 0.5 pulg de ancho y 9 pulg de longitud se prueba con un aparato de flexión con tres puntos, que tiene los soportes a 6 pulg de distancia. La deflexión o flecha del centro de la barra se mide en función de la carga aplicada. Los datos obtenidos se muestran a continuación. Calcule la resistencia a la flexión y el módulo de flexión.

Fuerza (lb)	Deflexión (pulg)
14.5	0.0025
28.9	0.0050
43.4	0.0075
57.9	0.0100
86.0	0.0149 (fractura)

- 6-41 a) Una barra de titanio de 0.4 pulg de diámetro y 12 pulg de longitud tiene una resistencia de cedencia de 50 000 psi, un módulo de elasticidad de 16×10^6 psi y un módulo de Poisson de 0.30. Calcule la longitud y el diámetro de la barra cuando se le aplica una carga de 500 libras. b) Cuando se aplica una carga de tensión a una varilla de cobre de 1.5 cm de diámetro, ese diámetro se reduce a 1.498 cm. Calcule la carga aplicada, con los datos de la tabla 6-3.
- 6-42 Se efectúa un ensayo de flexión en tres puntos a un bloque de ZrO_2 que tiene 8 pulg de longitud, 0.50 pulg de ancho y 0.25 pulg de grueso, que descansa sobre dos soportes a 4 pulg de distancia. Cuando se aplica una fuerza de 400 lb, el espécimen se flexiona 0.037 pulg y se rompe. Calcule
- la resistencia a la flexión y
 - el módulo de flexión, suponiendo que no hay deformación plástica.
- 6-43 Se lleva a cabo un ensayo de flexión en tres puntos, a un bloque de carburo de silicio de 10 cm de longitud, 1.5 cm de ancho y 0.6 cm de espesor, que descansa sobre dos soportes separados 7.5 cm. La muestra se rompe cuando se registra una deflexión de 0.09 mm. El módulo de flexión del carburo de silicio es 480 GPa. Suponga que no hay deformación plástica y calcule
- la fuerza que causó la fractura y
 - la resistencia a la flexión.
- 6-44 a) Un polímero termoestable que contiene perlas de vidrio debe flexionarse 0.5 mm cuando se le aplica una

fuerza de 500 N. La parte del polímero tiene 2 cm de ancho, 0.5 cm de grueso y 10 cm de longitud. Si el módulo de flexión es 6.9 GPa, calcule la distancia mínima entre los soportes. ¿Se romperá el polímero si su resistencia a la flexión es 85 MPa? Suponga que no se presenta deformación plástica. b) Una barra de alúmina de 0.3 pulg de grueso, 1.0 pulg de ancho y 10 pulg de longitud se coloca sobre soportes apartados 7 pulg. Calcule la deflexión al momento de romperse la barra, suponiendo que no hay deformación plástica. El módulo de flexión de la alúmina es 45×10^6 psi y su resistencia a la flexión es 46 000 psi.

- 6-45 Las cerámicas son mucho más resistentes a la compresión que a la tensión. Explique por qué.
- 6-46 ¿Por qué se puede cargar el peso de un camión de bomberos sobre cuatro tazas cafeteras de cerámica y, sin embargo, cuando se deja caer una de esas tazas al piso posiblemente se rompa con facilidad?
- 6-47 Las dislocaciones tienen un gran efecto sobre la deformación plástica de los metales, pero no desempeñan un gran papel en el comportamiento mecánico de las cerámicas. ¿Por qué?
- 6-48 ¿Qué controla la resistencia de las cerámicas y los vidrios?

Sección 6-7 Dureza de los materiales

- 6-49 ¿Qué significa el término "dureza de un material"?
- 6-50 ¿Por qué los datos de dureza son difíciles de correlacionar con las propiedades mecánicas de los materiales en una forma cuantitativa?
- 6-51 ¿Cuál es el material más duro (natural o sintético)? ¿Es el diamante?
- 6-52 Explique los términos "macro dureza", "micro dureza" y "nano dureza".
- 6-53 Una medición de dureza Brinell, con un penetrador de 10 mm de diámetro y una carga de 500 kg, produce una penetración de 4.5 mm en una placa de aluminio. Determine el número de dureza Brinell (NDB) de ese metal.
- 6-54 Cuando se aplica una carga de 3000 kg a una esfera de 10 mm de diámetro en un ensayo Brinell de un acero, se produce una penetración de 3.1 mm de diámetro. Estime la resistencia del acero a la tensión.
- 6-55 ¿Cómo se mide la nanodureza de los materiales?

Sección 6-8 Efectos de la velocidad de deformación y comportamiento al impacto

Sección 6-9 Propiedades que se obtienen en el ensayo de impacto

- 6-56 Los siguientes datos se tomaron en una serie de ensayos de impacto de Charpy, hechos con cuatro aceros, cada

uno con distinto contenido de manganeso. Grafique los datos y determine

- la temperatura de transición (definida por el promedio de las energías absorbidas en las regiones dúctil y frágil) y
- la temperatura de transición (definida como la temperatura que suministra 50 J de energía absorbida).

Temperatura de ensayo °C	Energía de impacto (J)			
	0.30% Mn	0.39% Mn	1.01% Mn	1.55% Mn
-100	2	5	5	15
-75	2	5	7	25
-50	2	12	20	45
-25	10	25	40	70
0	30	55	75	110
25	60	100	110	135
50	105	125	130	140
75	130	135	135	140
100	130	135	135	140

- 6-57 Trace la gráfica de temperatura de transición en función de contenido de manganeso y, con los datos anteriores, describa el efecto del manganeso sobre la tenacidad del acero. ¿Cuál sería el contenido mínimo del manganeso admisible en los componentes de acero que se usarán a 0 °C?

- 6-58 Los siguientes datos se tomaron en una serie de ensayos de impacto de Charpy, con cuatro hierros colados dúctiles, cada uno con distinto contenido de silicio. Trace la gráfica con los datos y determine

- la temperatura de transición (definida por el promedio de las energías absorbidas en las regiones dúctil y frágil) y
- la temperatura de transición (definida como la temperatura que suministra 10 J de energía absorbida).

Trace una gráfica de la temperatura de transición en función del contenido de silicio y describa el efecto del silicio sobre la tenacidad del hierro colado. ¿Cuál sería el contenido máximo de silicio admisible en el hierro colado si la parte se usará a 25 °C?

Temperatura de ensayo °C	Energía de impacto (J)			
	2.55% Si	2.85% Si	3.25% Si	3.63% Si
-50	2.5	2.5	2	2
-5	3	2.5	2	2
0	6	5	3	2.5
25	13	10	7	4
50	17	14	12	8
75	19	16	16	13
100	19	16	16	16
125	19	16	16	16

- 6-59 Con frecuencia se recomiendan metales FCC para usarlos a bajas temperaturas, en especial cuando se espera alguna carga repentina sobre la parte. Explique por qué.

- 6-60 Se puede fabricar un componente de acero por metalurgia de polvos: compactando polvo de hierro y sinterizándolos para formar un sólido, o bien maquinándolo a partir de un bloque macizo de acero. ¿Cuál de esas alternativas se espera que produzca un componente con mayor tenacidad? Explique por qué.

- 6-61 ¿Qué significa el término sensibilidad a muesca?

- 6-62 ¿Cuál es la diferencia entre un ensayo de tensión y un ensayo de impacto? A partir de esta explicación, describa por qué los valores de tenacidad obtenidos en ensayos de impacto no pueden correlacionarse con las tenacidades a la tensión, obtenidas en ensayos de tensión.

- 6-63 Varias aleaciones de aluminio y silicio tienen una estructura que comprende placas con bordes agudos de silicio frágil en la matriz de aluminio, más blando y dúctil. ¿Espera usted que esas aleaciones sean sensibles a un ensayo de impacto? ¿Espera usted que esas aleaciones tengan buena tenacidad? Explique sus respuestas.

- 6-64 ¿Qué es la temperatura de transición de dúctil a frágil?

- 6-65 Algunos polímeros y algunos metales y aleaciones se vuelven frágiles a bajas temperaturas. Pregunte a su profesor y explique por qué la causa de la fragilidad es distinta en esos materiales.

- 6-66 ¿Qué causó el accidente del *Challenger* en 1986?

- 6-67 ¿Cómo se define la tenacidad a la tensión en relación con el diagrama esfuerzo real-deformación real? ¿Cómo se relaciona la tenacidad a la tensión con la tenacidad al impacto?

Sección 6-10 Mecánica de la fractura

Y

Sección 6-11 Importancia de la mecánica de fracturas

- 6-68 La alúmina, Al_2O_3 , es una cerámica frágil con poca tenacidad. Suponga que en ella se pudieran embeber fibras de carburo de silicio, SiC , que es otra cerámica frágil con baja tenacidad. ¿Afectaría eso la tenacidad del material compuesto con matriz de alúmina? Explique por qué. Esos materiales se describirán en capítulos posteriores.

- 6-69 Una cerámica compuesta contiene imperfecciones internas hasta de 0.001 cm de longitud. La tenacidad a la fractura en el plano de ese material es $45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ y la resistencia a la tensión es 550 MPa. ¿Un esfuerzo causará la falla del material compuesto antes de alcanzar la resistencia a la tensión? Suponga que $f = 1$.

- 6-70 Una aleación de aluminio tiene una tenacidad a la fractura en el plano de 25 000 psi $\sqrt{\text{pulg.}}$, y falla cuando se le aplica un esfuerzo de 42 000 psi. Al observar la superficie de la fractura, se observa que ésta comenzó en la superficie del componente. Estime el tamaño de la imperfección que inició la fractura. Suponga que $f = 1.1$.
- 6-71 Un polímero que contiene varias imperfecciones internas de 1 mm de longitud falla con un esfuerzo de 25 MPa. Calcule la tenacidad a la fractura en deformación plana de ese polímero. Suponga que $f = 1$.
- 6-72 Una parte de cerámica para un motor de reacción tiene resistencia de cedencia de 75 000 psi, y tenacidad a la fractura en el plano de 5 000 psi $\sqrt{\text{pulg.}}$. Para cerciorarse de que no falle la parte, se quiere asegurar que el esfuerzo aplicado máximo sólo sea la tercera parte de la resistencia de cedencia. Se usa una prueba no destructiva que indica todas las imperfecciones internas de mayor longitud que 0.05 pulg. Suponiendo que $f = 1.4$, ¿esa prueba no destructiva tiene la sensibilidad necesaria? Explique por qué.
- 6-73 Explique cómo se puede obtener la tenacidad de la cerámica a la fractura con ensayos de dureza, y explique por qué ese método da resultados cualitativos.

Sección 6-12 Propiedades microestructurales de la fractura en materiales metálicos

y

Sección 6-13 Propiedades microestructurales de las fracturas en cerámicos, vidrios y materiales compuestos

- 6-74 Explique los términos fracturas intergranulares e intragranulares. Con un esquema indique los granos, los límites de grano y la trayectoria de las grietas, característicos de la fractura intergranular e intragranular en los materiales.
- 6-75 ¿Cuáles son las propiedades microestructurales características que se asocian con una fractura dúctil?
- 6-76 ¿Cuáles son las propiedades microestructurales características que se asocian con una fractura frágil en un material metálico?
- 6-77 ¿Qué materiales muestran en forma normal una fractura concooidal?
- 6-78 Describa en forma breve cómo pueden fallar los materiales compuestos reforzados con fibras.
- 6-79 Se sabe que algunos componentes de aviación fabricados con materiales compuestos reforzados con fibra de carbono fallan en forma repentina por delaminación. Es difícil ver el daño en esas clases de materiales, porque está en su interior. Describa la fractura en esos materiales.
- 6-80 El concreto tiene una resistencia excepcional a la compresión, pero falla con bastante facilidad a la tensión. Explique por qué.
- 6-81 ¿Qué controla la resistencia de los vidrios? ¿Qué se puede hacer para aumentar la resistencia de los vidrios de silicato?

Sección 6-14 Estadística de Weibull para análisis de resistencia a la falla

- 6-82 Trace un esquema de la resistencia de los cerámicos y la de los metales y aleaciones, en función de la probabilidad de falla. Explique las diferencias que pronostica usted.
- 6-83 ¿Por qué la resistencia de las cerámicas varía tanto cuando varía el tamaño de los componentes de cerámica?
- 6-84 ¿Qué parámetro indica la variabilidad de la resistencia de los cerámicos y los vidrios?
- 6-85 ¿Por qué las fibras de vidrio de distintas longitudes tienen distintas resistencias?
- 6-86 Explique la importancia de la distribución de Weibull.

Sección 6-15 Fatiga,

Sección 6-16 Resultados del ensayo de fatiga y

Sección 6-17 Aplicación de los ensayos de fatiga

- 6-87 Un espécimen cilíndrico de acero para herramientas tiene 6 pulg de longitud y 0.25 pulg de diámetro; gira en forma de viga en voladizo y se debe diseñar de modo que nunca falle. Suponiendo que los esfuerzos máximos de tensión y compresión sean iguales, calcule la carga máxima que se puede aplicar al extremo de la viga (véase la Fig. 6-50).
- 6-88 Una barra de 2 cm de diámetro y 20 cm de longitud, de un polímero de acetal (Fig. 6-61) se carga en un extremo y se espera que resista un millón de ciclos de carga, con esfuerzos máximos de tensión y de compresión iguales. ¿Cuál es la carga máxima admisible que se le puede aplicar?
- 6-89 Se va a ejercer una carga de 1500 lb en el extremo de una viga de aluminio de 10 pulg de longitud (Fig. 6-50). Esa barra debe durar al menos 10^6 ciclos. ¿Qué diámetro mínimo debe tener?
- 6-90 Una barra cilíndrica de polímero de acetal tiene 20 cm de longitud y 1.5 cm de diámetro, y se somete a una carga de 50 N, con 500 vibraciones por minuto. ¿Cuántas horas durará esa parte sin romperse (Véase la Fig. 6-61.)
- 6-91 Suponga que se desea que una parte producida con el polímero de acetal de la figura 6-61 dure un millón de ciclos bajo condiciones que produzcan esfuerzos de tensión y de compresión iguales. ¿Cuál es la resistencia a la fatiga, o la amplitud máxima de esfuerzos, que se requiere? ¿Cuáles son el esfuerzo máximo, el esfuerzo mínimo y el esfuerzo promedio en esa parte

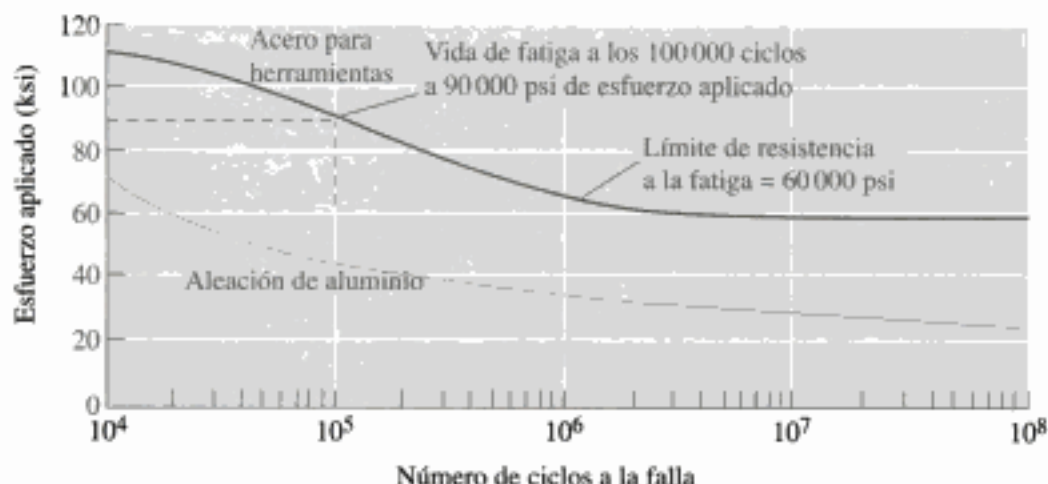


Figura 6-50 (Repetida para los problemas 6-87 y 6-89). Curvas S-N, de esfuerzo-cantidad de ciclos a la falla, para un acero grado herramienta y una aleación de aluminio.

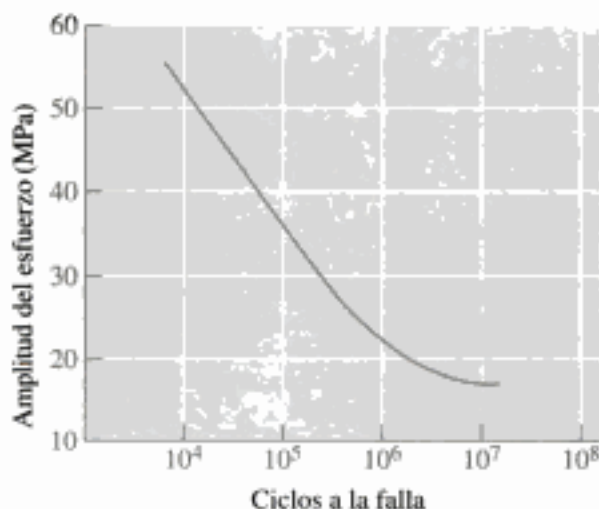


Figura 6-61 Curva de fatiga S-N para un polímero de acetil (para los problemas 6-88, 6-90 y 6-91).

durante su funcionamiento? ¿Qué efecto tendría la frecuencia de la aplicación del esfuerzo sobre las respuestas? Explique por qué.

- 6-92 El acero de alta resistencia de la figura 6-52 se somete a un esfuerzo que alterna a 200 revoluciones por minuto, entre 600 MPa y 200 MPa, ambos de tensión. Calcule la rapidez de crecimiento de una grieta superficial cuando alcanza una longitud de 0.2 mm tanto en m/ciclo como en m/s. Suponga que $f = 1.0$.
- 6-93 El acero de alta resistencia de la figura 6-52, cuya tenacidad crítica a la fractura es $80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, se somete a un esfuerzo alternativo, de -900 MPa (compresión) a $+900 \text{ MPa}$ (tensión). Debe durar 10^5 ciclos sin romperse. Suponga que $f = 1$ y calcule:

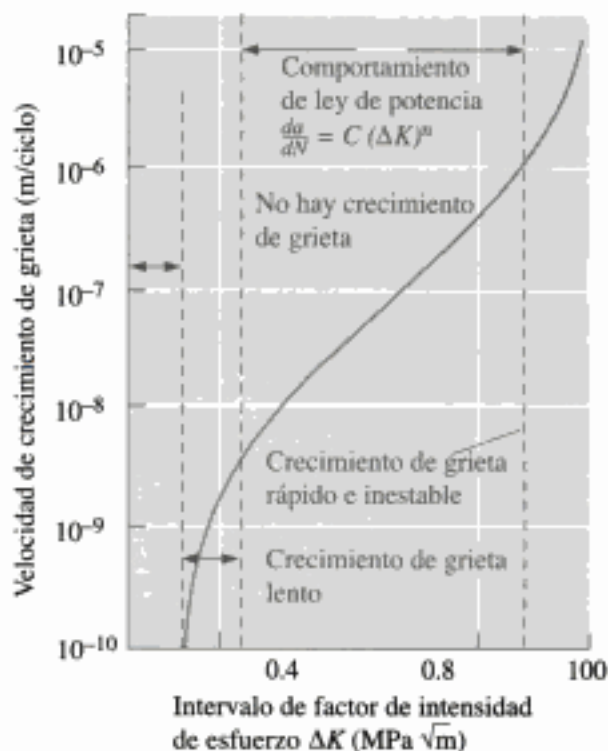


Figura 6-52 (Repetida para los problemas 6-92 y 6-93). Velocidad de crecimiento de grieta en función del intervalo de factor de intensidad de esfuerzo para un acero de alta resistencia. Para este acero, $C = 1.62 \times 10^{-12}$ y $n = 3.2$ para las unidades indicadas.

- el tamaño de una grieta superficial, necesario para que se presente la fractura y
- la grieta superficial inicial más grande que permita que eso suceda.

- 6-94 El polímero de acrílico con el que se obtuvo la figura 6-62 tiene una tenacidad crítica de fractura de $2 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$. Se somete a un esfuerzo que alterna entre -10 y $+10 \text{ MPa}$. Calcule la velocidad de crecimiento de una grieta superficial cuando llega a una longitud de $5 \times 10^{-6} \text{ m}$, si $f = 1.0$.

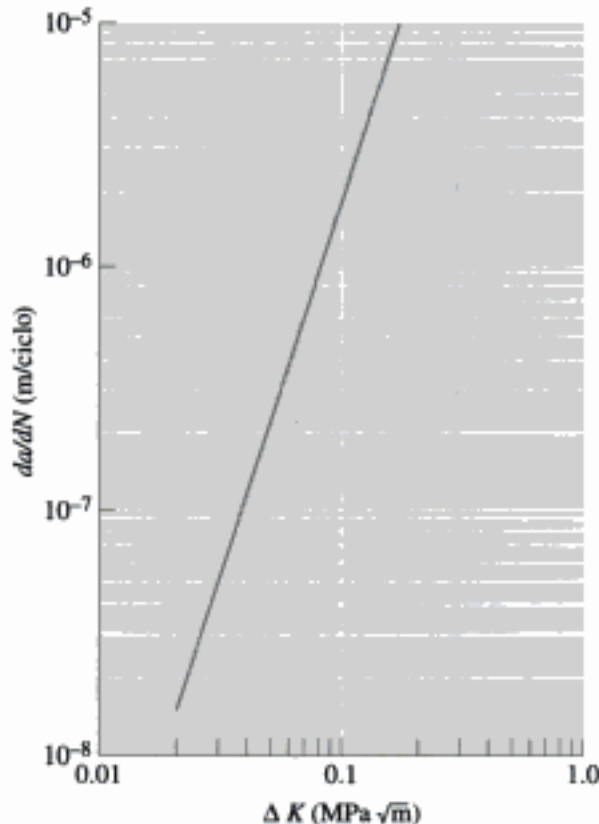


Figura 6-62 Velocidad de crecimiento de grieta para un polímero de acrílico (para los problemas 6-94, 6-95 y 6-96).

- 6-95 Calcule las constantes C y n en la ecuación 6-36, para la velocidad de crecimiento de grieta en un polímero de acrílico (véase la Fig. 6-62).
- 6-96 El polímero de acrílico con el que se obtuvo la figura 6-62 se somete a un esfuerzo alternativo entre 15 MPa y 0 MPa . Las grietas superficiales máximas que se detectaron al principio, con pruebas no destructivas, tienen una longitud de 0.001 mm . Si la tenacidad crítica de fractura del polímero es $2 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$, calcule la cantidad de ciclos antes de que se presente la falla. Suponga que $f = 1.0$. (Sugerencia: use el resultado del problema anterior.)
- 6-97 Explique cómo sucede la falla, aun cuando el material no tenga valores de esfuerzo general mayores que la resistencia de cedencia.

- 6-98 Compruebe que la integración de $da/dN = C(\Delta K)^n$ da como resultado la ecuación 6-38.

- 6-99 ¿Qué es granallado? ¿Cuál es el objetivo de este proceso?

Sección 6-18 Termofluencia, ruptura por esfuerzo y corrosión bajo esfuerzos

- 6-100 Defina el término "termofluencia" y describa la diferencia entre termofluencia y relajación de esfuerzo.
- 6-101 ¿Qué significan los términos "esfuerzo de ruptura" y "corrosión bajo esfuerzos"?
- 6-102 ¿Cuál es la diferencia entre la falla de un material por termofluencia y por esfuerzo de ruptura?
- 6-103 La energía de activación para autodifusión en cobre es $49\,300 \text{ cal/mol}$. Un espécimen de cobre fluye a $0.002 \frac{\text{pulg}}{\text{pulg h}}$, cuando se le aplica un esfuerzo de $15\,000 \text{ psi}$ a 600°C . Si la velocidad de termofluencia del cobre depende de la autodifusión, calcule la velocidad de termofluencia si la temperatura es de 800°C .
- 6-104 Cuando se aplica un esfuerzo de $20\,000 \text{ psi}$ a un material calentado a 900°C , se presenta la ruptura a las $25\,000 \text{ h}$. Si la energía de activación para la ruptura es $35\,000 \text{ cal/mol}$, determine el tiempo de ruptura si la temperatura se reduce a 800°C .
- 6-105 Los datos siguientes se obtuvieron en un ensayo de termofluencia, con un espécimen de 2.0 pulg de longitud calibrada y un diámetro inicial de 0.6 pulg . El esfuerzo inicial aplicado al material es de $10\,000 \text{ psi}$. El diámetro del espécimen después de la ruptura es 0.52 pulg .

Longitud entre marcas de calibración (pulg)	Tiempo (h)
2.004	0
2.010	100
2.020	200
2.030	400
2.045	1000
2.075	2000
2.135	4000
2.193	6000
2.230	7000
2.300	8000 (fractura)

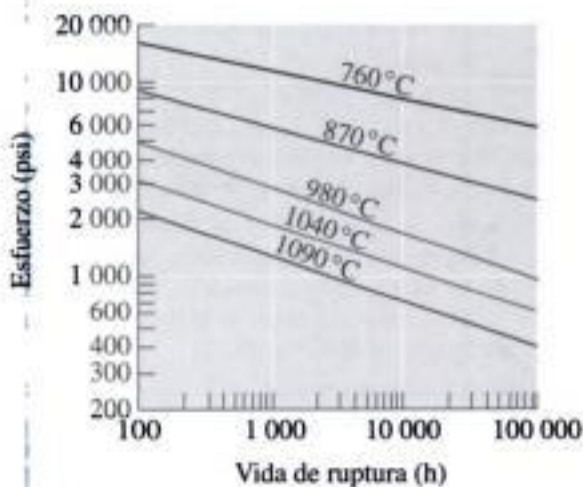
Determine

- la carga aplicada al espécimen durante el ensayo,
- el tiempo aproximado durante el cual se desarrolla la termofluencia lineal,
- la velocidad de termofluencia en $\frac{\text{pulg}}{\text{pulg h}}$ y en $\%/h$ y
- el esfuerzo real que actúa sobre el espécimen en el momento de romperse.

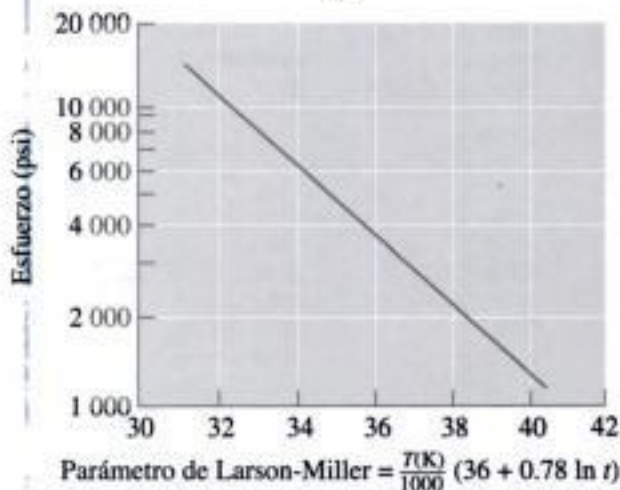
- 6-106 Un acero inoxidable se mantiene a 705 °C con distintas cargas. Se obtuvieron los siguientes datos:

Esfuerzo aplicado (MPa)	Tiempo de ruptura (h)	Velocidad de termofluencia (%/h)
106.9	1200	0.022
128.2	710	0.068
147.5	300	0.201
160.0	110	0.332

Calcule los exponentes n y m en las ecuaciones 6-40 y 6-41, que describen la dependencia entre la velocidad de termofluencia y el tiempo de ruptura para un esfuerzo aplicado.



(a)



(b)

Figura 6-59 (Repetida para los problemas 6-107 a 6-113). Resultados de una serie de ensayos de termofluencia. (a) Curvas esfuerzo-ruptura para una aleación de hierro, cromo y níquel y (b) el parámetro de Larson-Miller para hierro colado dúctil.

- 6-107 Con los datos de la figura 6-59(a) para una aleación de hierro, cromo y níquel, calcule la energía de activación Q , y la constante m para la ruptura en el intervalo esperado de 980 a 1090 °C.
- 6-108 Una barra de 1 pulg de diámetro, de una aleación de hierro, cromo y níquel, se somete a una carga de 2500 lb. ¿Cuántos días durará sin romperse a 980 °C? [Véase la Fig. 6-59(a).]
- 6-109 Una barra de 5 mm $\times$ 20 mm de una aleación de hierro, cromo y níquel debe funcionar a 1040 °C durante 10 días sin romperse. ¿Cuál es la carga máxima que se le puede aplicar? [Véase la Fig. 6-59(a).]
- 6-110 Una aleación de hierro, cromo y níquel debe resistir una carga de 1500 lb a 760 °C durante seis años. Calcule el diámetro mínimo de la barra. [Véase la Fig. 6-59(a).]
- 6-111 Una barra de 1.2 pulg de diámetro, de una aleación de hierro, cromo y níquel, debe trabajar durante cinco años bajo una carga de 4000 lb. ¿Cuál es la temperatura máxima de funcionamiento? [Véase la Fig. 6-59(a).]
- 6-112 Una barra de hierro colado dúctil, de 1 pulg $\times$ 2 pulg debe funcionar durante nueve años a 650 °C. ¿Cuál es la máxima carga que se le puede aplicar? [Véase la Fig. 6-59(b).]
- 6-113 Una barra de hierro colado dúctil debe funcionar con un esfuerzo de 6000 psi durante un año. ¿Cuál es la temperatura máxima admisible? [Véase la Fig. 6-59(b).]

✱ Problemas de diseño

- 6-114 Un gancho (Fig. 6-63) para alzar contenedores de mineral, en una mina, se debe diseñar con un material no ferroso. (Se usa material no ferroso porque el hierro y el acero pueden causar una chispa que podría encender gases peligrosos en la mina.) El gancho



Figura 6-63 Gancho (para el problema 6-114).

debe sostener una carga de 25 000 libras y se debe usar un factor de seguridad de 2. Se ha determinado que el corte transversal indicado con "T" es la zona más crítica; el resto del gancho está sobrediseñado. Determine los requisitos de diseño para este dispositivo y, con base en los datos de propiedades mecánicas en los capítulos 13 y 14, y con los precios de metales y aleaciones obtenidos en fuentes como periódicos locales, el sitio de London Metal Exchange en Internet o en *The Wall Street Journal*, diseñe el gancho y seleccione un material económico para fabricarlo.

- 6-115 Una barra de soporte del tren de aterrizaje de un avión privado está sometida a una carga de tensión al aterrizar. Las cargas pronosticadas serán hasta de 40 000 libras. Como la barra es fundamental y la falla podría causar pérdidas de vidas, se debe diseñar con un factor de seguridad de 4; esto es, para que sea capaz de soportar cargas cuádruples de las que se esperan. También, el funcionamiento del sistema produce cargas que pueden inducir grietas en la barra. El equipo de pruebas no destructivas con que se cuenta puede detectar grietas mayores que 0.02 pulg de profundidad. Con base en los materiales de la tabla 6-6, diseñe la barra de soporte y el material, y justifique su respuesta.
- 6-116 Una flecha de transmisión ligera para una bomba en un avión aeroespacial se debe diseñar para soportar una carga cíclica de 15 000 libras durante su servicio. El esfuerzo máximo es igual en tensión y en compresión. Los límites de duración o resistencias a la fatiga de distintos materiales probables se muestran abajo. Diseñe el eje, incluyendo el material adecuado, y justifique su solución.

Material	Límite de duración/ resistencia a la fatiga (MPa)
Aleación Al-Mn	110
Aleación Al-Mg-Zn	225
Aleación Cu-Be	295
Aleación Mg-Mn	80
Aleación de Be	180
Aleación de tungsteno	320

- 6-118 Una barra de hierro colado dúctil debe soportar una carga de 40 000 lb en un horno de tratamiento térmico en el que se fabrica hierro colado maleable. La barra está en una zona expuesta continuamente a 500 °C.

Diseñe la barra para que pueda funcionar durante al menos 10 años sin fallar.



Problemas en computadora

- 6-119 *Calculadora de durezas.* Escriba un programa de computadora que calcule la dureza Brinell de los materiales. Debe pedir al usuario que ingrese el diámetro del penetrado (D) en milímetros, la carga aplicada F en kilogramos y el diámetro de la impresión formada (D_p) en milímetros. El programa debe calcular el valor de número de Brinell con la ecuación 6-16.
- 6-120 *Datos y cálculos de ensayo de tensión.* Escriba un programa de computación que produzca resultados útiles para el usuario, a partir de datos de ensayos de tensión. Primero, el programa debe leer información importante para el registro, como fecha, nombre del operador, número de la muestra, etc. También debe dar al usuario la oportunidad de usar unidades inglesas o SI. Después, el programa debe leer las dimensiones de la muestra y la longitud calibrada que se usó. Debe leer una serie de datos (hasta un máximo de 50 conjuntos de valores de carga y el alargamiento correspondiente). También debe preguntar al usuario una rapidez de deformación con la que se hizo el ensayo y anotarla. El resultado del programa debe mostrar valores de esfuerzo ingenieril, deformación ingenieril, esfuerzo real, deformación real y de carga máxima. El programa debe proporcionar los valores de la resistencia a la tensión, resistencia de fractura y ductilidad (100 veces la deformación unitaria a la falla). Por último, use el programa Excel™, Origin™ o Sigma Plot™ para trazar las gráficas de carga en función de alargamiento, esfuerzo en función de deformación unitaria y esfuerzo real en función de deformación unitaria real. Usando esa gráfica, calcule la resistencia de cedencia con el criterio de 0.2% de deformación convencional y el módulo de Young. Pruebe su programa con cualquiera de los conjuntos de datos del texto.
- 6-121 *Calculadora de resistencia a la flexión o módulo de ruptura.* Escriba un programa que pida al usuario escribir el valor de la carga de fractura (F), la distancia entre los puntos externos (L), el ancho del espécimen (w) y la altura (h). El programa debe usar entonces la ecuación 6-13 para calcular la resistencia a la flexión (módulo de ruptura).

By Arkanosant...

Capítulo



En aplicaciones tales como el prensado en la estructura de chasis para automóviles, se deforman metales y aleaciones. Las propiedades mecánicas de los materiales cambian durante este proceso, debido al endurecimiento por deformación. El comportamiento de endurecimiento por deformación de los aceros que se usan en la fabricación de un chasis influye sobre su capacidad para moldearse en formas aerodinámicas. También es importante este comportamiento para mejorar la resistencia de los vehículos contra los choques. [Cortesía de PhotoDisc/Getty Images.]

Endurecimiento por deformación y recocido

¿Alguna vez se preguntó...

- *...por qué al doblar un alambre de cobre, éste se endurece?*
- *...qué clase de acero mejora la resistencia de los vehículos contra los choques?*
- *...cómo se fabrican las latas de aluminio para bebidas?*
- *...por qué los termoplásticos se vuelven más resistentes al deformarlos?*
- *...cuál es la diferencia entre un vidrio de seguridad recocido, templado y laminado?*
- *...por qué la resistencia del material metálico en torno a una soldadura podría ser menor que el material cercano a él?*
- *...pueden estirarse los materiales cerámicos varios cientos de puntos porcentuales?*

En este capítulo, aprenderemos la forma en que el procesamiento mecánico y los tratamientos térmicos influyen sobre la resistencia de los metales y las aleaciones. En el capítulo 4 aprendimos las diversas técnicas que pueden endurecer a los metales y aleaciones, por ejemplo, aumento de densidad de dislocaciones, disminución del tamaño de grano, adición de elementos aleantes, etc. En este capítulo, se

explicará cómo aumentar la resistencia de los metales y aleaciones mediante el trabajo en frío, que es un proceso por el cual un material metálico se deforma y se endurece al mismo tiempo. También veremos cómo se puede usar el trabajo en caliente para moldear a los metales y las aleaciones, deformándolos a altas temperaturas sin endurecerlos. Aprenderemos cómo el tratamiento térmico llamado recocido se pue-

de usar para mejorar la ductilidad y contrarrestar el aumento de dureza causado por el trabajo en frío. El endurecimiento que se obtiene durante el trabajo en frío, que se debe al aumento de densidad de dislocaciones, se llama endurecimiento por deformación o endurecimiento por trabajado. Al controlar el procesamiento termomecánico (es decir, combinando el procesamiento mecánico y el tratamiento térmico) se pueden procesar los materiales metálicos para obtener formas que se puedan usar y también mejorar y controlar sus propiedades mecánicas.

Los temas que se explican en este capítulo se refieren en especial a los metales y a las aleaciones. El endurecimiento por deformación, que se obtiene por multiplicación de dislocaciones, requiere que el material tenga ductilidad. Se usa el endurecimiento por deformación para aumentar la resistencia de un material. En los procesos de manufactura se deben contrarrestar los efectos del endurecimiento por deformación. Por ejemplo, cuando se trefila un alambre o se extruye un tubo, puede presentarse endurecimiento por deformación, y habrá que asegurar que el producto aún tiene una ductilidad aceptable. Los automóviles y camiones se fabrican estampando un material llamado lámina de acero. Este proceso permite obtener un chasis aerodinámico y estéticamente agradable. La lámina de acero que se use debe tener capacidad de estirarse y doblarse con facilidad durante el estampado. Sin embargo, en último término se debe producir un acero resistente, que pueda tolerar choques menores y grandes impactos.

El aumento de resistencia del acero que resulta por el endurecimiento por deformación ayuda en este aspecto. Además, para tener mejor resistencia a las colisiones, se deben usar aceros que muestren, durante la carga de impacto, un endurecimiento por deformación muy rápido.

¿Y qué decir de los polímeros, vidrios y cerámicos? ¿Muestran también endurecimiento por deformación? Explicaremos que, con frecuencia, la deformación de los polímeros termoplásticos produce un efecto fortalecedor. Sin embargo, aquí el mecanismo de endurecimiento por deformación es totalmente distinto que en los materiales metálicos. La resistencia de la mayoría de los materiales frágiles, como los cerámicos y los vidrios, depende de las imperfecciones y de la distribución de sus tamaños (capítulo 6). En consecuencia, los vidrios inorgánicos y los cerámicos no responden bien al endurecimiento por deformación. Por lo anterior, se deben tener en cuenta distintas estrategias para endurecer esos materiales. En este contexto, aprenderemos los principios del templado y recocido de los vidrios. También examinaremos condiciones bajo las cuales los materiales cerámicos pueden presentar deformaciones plásticas, de varios cientos de puntos porcentuales. Entonces ¡todos los materiales cerámicos no son intrínsecamente frágiles! Hay condiciones bajo las cuales muchos cerámicos pueden tener una ductilidad considerable.

Comenzaremos explicando el endurecimiento por deformación en los materiales metálicos, en el contexto de las curvas esfuerzo-deformación unitaria.

7-1 Relación entre el trabajo en frío y la curva esfuerzo-deformación unitaria

En la figura 7-1(a) se muestra una curva de esfuerzo-deformación unitaria para un material dúctil. Si se aplica un esfuerzo σ_1 mayor que la resistencia de cedencia σ_y , causa una deformación permanente. Cuando se retira el esfuerzo, deja tras de sí una deformación unitaria ϵ_1 . Si se hace un ensayo de tensión al material que se esforzó hasta σ_1 , se obtiene la curva esfuerzo-deformación de la figura 7-1(b). El nuevo espécimen de ensayo comenzaría a deformarse plásticamente, o a fluir, a un valor del esfuerzo σ_1 . Se define el **esfuerzo de fluencia** como el esfuerzo necesario para iniciar el flujo plástico en el material ya deformado.[1] Así, σ_1 es ahora el esfuerzo de fluencia del material. Si se continúa aplicando un esfuerzo hasta alcanzar σ_2 y se libera el esfuerzo, y de nuevo se ensaya el material metálico, el nuevo esfuerzo de fluencia

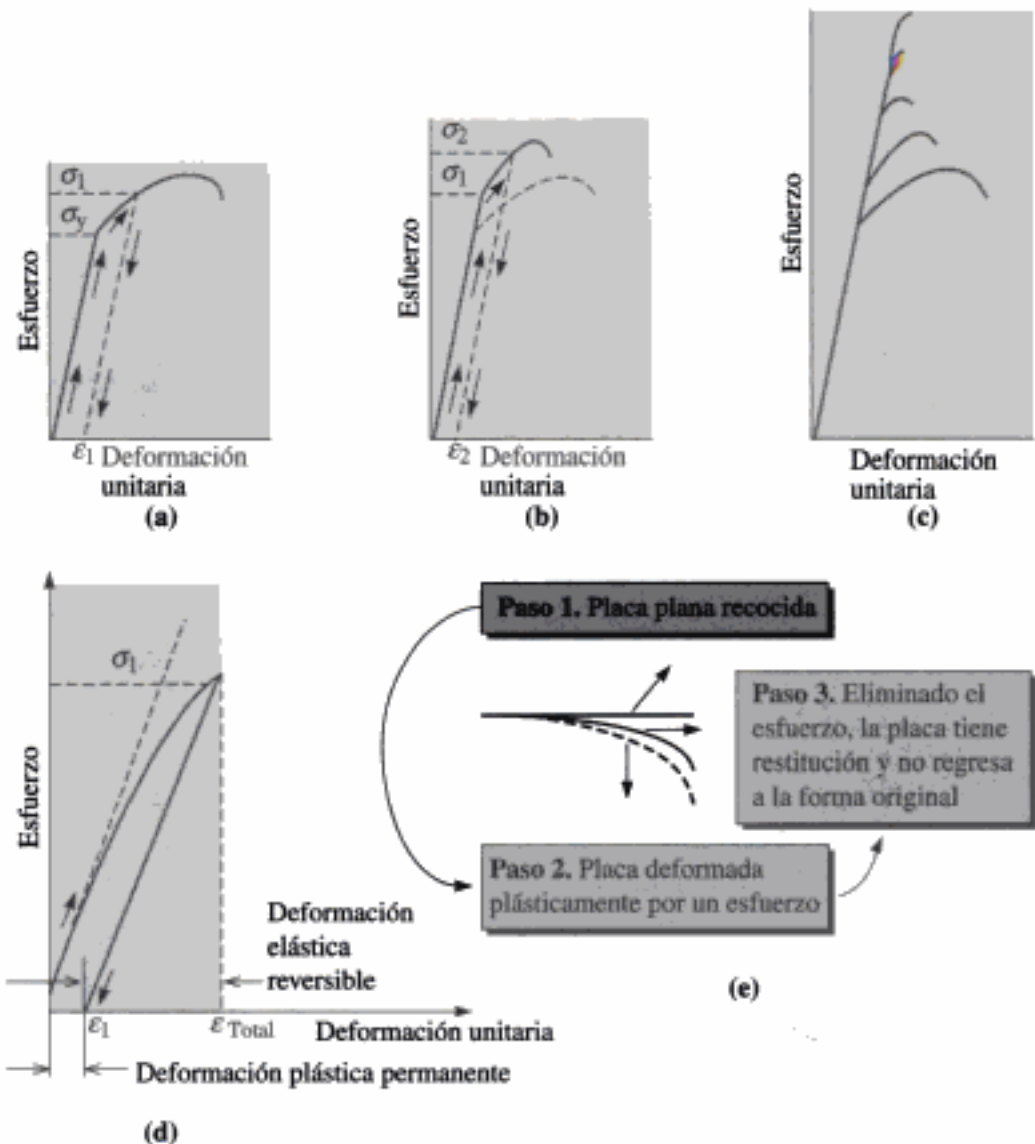


Figura 7-1 Desarrollo del endurecimiento por deformación en el diagrama esfuerzo-deformación unitaria. (a) Un espécimen se somete a un esfuerzo mayor que la resistencia de cedencia antes de quitar el esfuerzo. (b) Ahora el espécimen tiene una mayor resistencia de cedencia y también mayor resistencia a la tensión, pero menor ductilidad. (c) Al repetir el procedimiento, la resistencia continúa aumentando y la ductilidad continúa descendiendo, hasta que la aleación se vuelve muy frágil. (d) Obsérvese la deformación total y la recuperación de deformación elástica causan una deformación plástica residual y (e) restitución. (Fuente: *Reimpreso de Engineering Materials I*, 2a. ed., M.F. Ashbey y D.R.H. Jones, 1996. Copyright © 1996 Butterworth-Heinemann. Reimpreso con autorización de Elsevier Science.)

es σ_2 . Cada vez que se aplica un esfuerzo mayor, el esfuerzo de fluencia y la resistencia (máxima) a la tensión aumentan, y la ductilidad disminuye. Al final, el material metálico se fortalece hasta que el esfuerzo de fluencia y las resistencias (máxima) a la tensión y de ruptura son iguales, y no hay ductilidad [Fig. 7-1(c)]. En este punto, el material metálico ya no se puede deformar plásticamente. Las figuras 7-1(d) y (e) se relacionan con la recuperación, concepto que se explicará un poco más adelante, en esta sección.

Al aplicar un esfuerzo mayor que la resistencia de cedencia original del material metálico, se ha **endurecido por deformación**, o **trabajado en frío** ese metal, y al mismo tiempo se

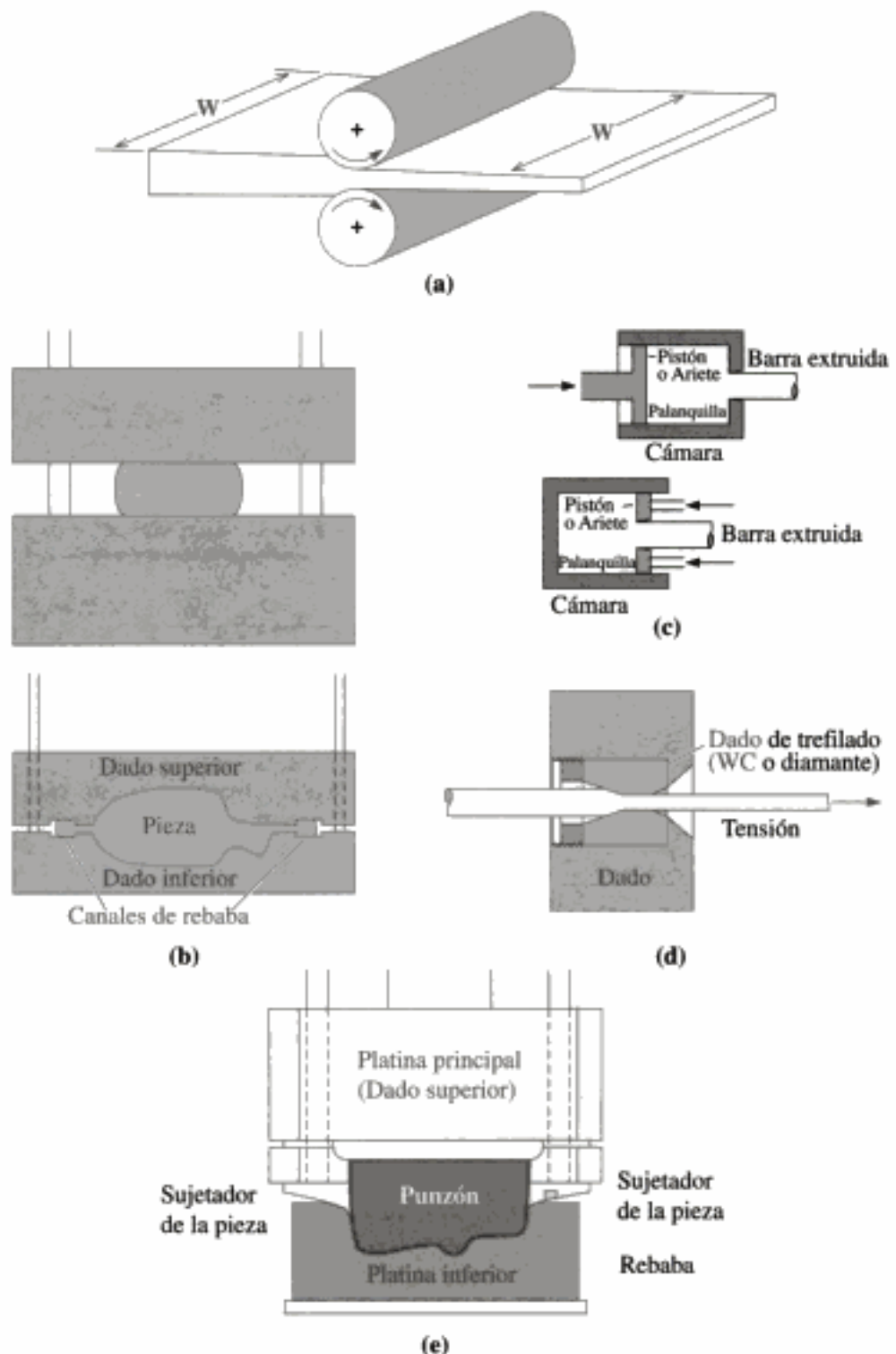


Figura 7-2 Procesos de manufactura que emplean el trabajo en frío y el trabajo en caliente. Métodos comunes para trabajar metales. (a) Laminado. (b) Forjado (matriz abierta y cerrada). (c) Extrusión (directa e indirecta). (d) Trefilado o estirado de alambre. (e) Estampado. (Adaptado de Mechanical Behavior of Materials, por Meyers, M.A. y Chawla, K.K., Prentice Hall, 1999.) (Fuente: Adaptado de Mechanical Behavior of Materials, por M.A. Meyers y K.K. Chawla, p. 292, fig. 6-1. Copyright © 1999 Prentice Hall. Reproducido con autorización de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.)

deformó. Es la base de muchas técnicas de manufactura, como el trefilado. La figura 7-2 ilustra varios procesos de manufactura que usan procesos de trabajo en frío y en caliente. Más adelante en este capítulo describiremos la diferencia entre el **trabajo en caliente** y el **trabajo en frío**. Para moldear y endurecer al mismo tiempo un material por trabajo en frío se usan muchas técnicas (Fig. 7-2). Por ejemplo, el **laminado** se usa para producir placas, láminas u hojas de metal. El **forjado** deforma el metal en la cavidad de una matriz, dado, troquel o molde, produciendo formas relativamente complicadas, como por ejemplo, los cigüeñales y las bielas de los automóviles. En el **trefilado** o **estirado** se tira de una varilla metálica a través de un dado para producir un alambre o una fibra. En la **extrusión**, un material metálico se empuja a través de un dado para obtener productos con sección transversal uniforme, como varillas, tubos o las molduras de aluminio para puertas o ventanas. El **estampado profundo**, se usa para formar el cuerpo de las latas de aluminio para bebidas.[2] El **moldeo por estiramiento** y el **doblado** se usan para conformar o moldear materiales en lámina. Por lo anterior, el trabajo en frío es una forma eficaz de moldear los materiales metálicos, y al mismo tiempo de aumentar su resistencia. La desventaja de este proceso es la pérdida de la ductilidad. Si se toma un alambre de metal y se dobla varias veces, se endurecerá y terminará por romperse, a causa del endurecimiento por deformación. El endurecimiento por deformación se usa para obtener muchos productos, en especial los que no van a exponerse a temperaturas muy altas. Por ejemplo, una lata de aluminio para bebida obtiene casi el 70% de su resistencia por el endurecimiento por deformación durante su fabricación. También, una parte de la resistencia de las latas de aluminio se debe a los elementos aleantes que se le agregan, por ejemplo, el Mg. Obsérvese que muchos de los procesos, como por ejemplo el laminado, se pueden hacer con trabajo en frío y también en caliente. Más adelante en este capítulo se describirán los pros y los contras de usar cada uno.

Exponente de endurecimiento por deformación (n) La respuesta de un material metálico al trabajo en frío se determina por el **exponente de endurecimiento por deformación** n , que es la pendiente de la porción plástica de la curva *esfuerzo real-deformación unitaria real* de la figura 7-3, cuando se usan escalas logarítmicas:

$$\sigma_t = K \epsilon_t^n \quad (7-1a)$$

o sea

$$\ln \sigma_t = \ln K + n \ln \epsilon_t \quad (7-1b)$$

La constante K (coeficiente de resistencia) es igual al esfuerzo cuando $\epsilon_t = 1$. El exponente de endurecimiento por deformación es relativamente pequeño en los metales HCP, pero es mayor en los metales BCC y en especial en los FCC (tabla 7-1). Los metales con menor exponente de endurecimiento por deformación responden mal al trabajo en frío. Si se toma un alambre de cobre y se dobla, el alambre doblado es más resistente debido al endurecimiento por deformación.



Figura 7-3

Curvas de esfuerzo real-deformación unitaria real para metales con exponentes grandes y pequeños de endurecimiento por deformación. Se obtiene mayor fortalecimiento para determinada deformación unitaria en el metal con mayor n .

TABLA 7-1 ■ Exponentes de endurecimiento por deformación de metales y aleaciones típicos

Metal	Estructura cristalina	n	K (psi)
Titanio	HCP	0.05	175 000
Acero aleado recocido	BCC	0.15	93 000
Acero al medio carbono templado y revenido	BCC	0.10	228 000
Molibdeno	BCC	0.13	105 000
Cobre	BCC	0.54	46 000
Cu-30% Zn	FCC	0.50	130 000
Acero inoxidable austenítico	FCC	0.52	220 000

Adaptado de G. Dieter, Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill, 1961 y otras fuentes.

Sensibilidad a la velocidad de deformación (m) La sensibilidad a la velocidad de deformación (m) del esfuerzo se define como sigue:

$$m = \left[\frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial(\ln \dot{\epsilon})} \right] \quad (7-2)$$

Esto describe cómo responde un endurecimiento por deformación rápida a la deformación plástica. Como se mencionó antes, el comportamiento mecánico de los aceros laminados bajo altas velocidades de deformación ($\dot{\epsilon}$) no sólo es importante para moldearlos, sino también para que funcione bien el acero bajo grandes cargas de impacto. La resistencia de los aceros laminados a choques es un factor importante en la industria automotriz. Los aceros que se endurecen con rapidez bajo cargas de impacto son adecuados para absorber energía mecánica.

Un valor positivo de m implica que el material resiste la formación de cuello (capítulo 6). Valores grandes de m y n significan que el material puede tener una moldeabilidad todavía mejor en el estirado. Sin embargo, esos valores no afectan las características del trefilado profundo. Para este proceso, es importante la **relación de deformación plástica (r)**. [3] Esta relación de deformación plástica se define como:

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{h}{h_0}\right)} \quad (7-3)$$

En esta ecuación, w y h son el ancho y el espesor del material que se procesa, y el subíndice cero indica dimensiones originales. Con frecuencia se usan los diagramas de límite de formabilidad para comprender mejor la **formabilidad**, **moldeabilidad** o **conformabilidad** de los materiales metálicos. En general, se define la formabilidad de un material como su capacidad de mantener su integridad conforme se le da forma. Con frecuencia, la formabilidad del material se describe en términos de dos deformaciones: una deformación principal, que siempre es positiva, y una deformación menor, que podría ser positiva o negativa. Como se muestra en la figura 7-4, las condiciones de deformación en la parte izquierda hace que los círculos troquelados en muestras se vuelvan elipses; para las condiciones de la parte derecha, los círculos más pequeños estampados en muestras se transforman en círculos mayores, lo que indica un estiramiento. [4] Los diagramas de límite de formabilidad ilustran las regiones en las que se puede procesar el material, sin poner en peligro su integridad mecánica.

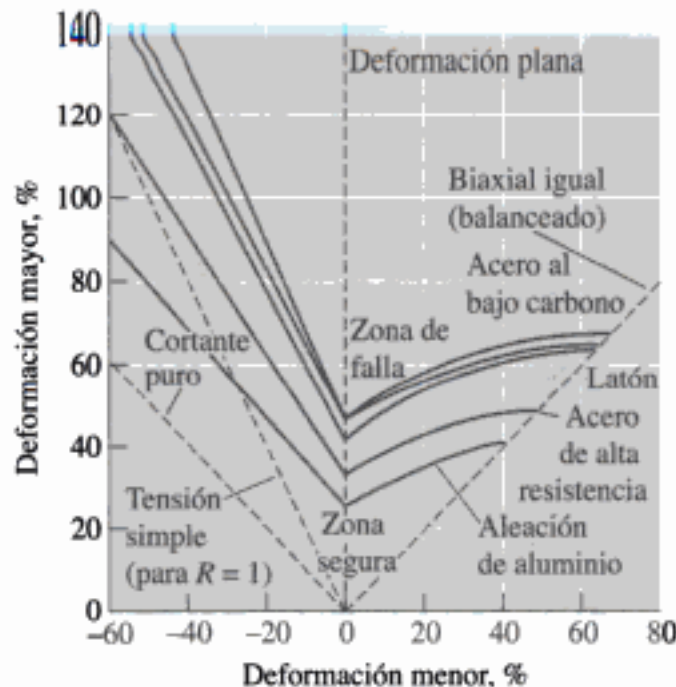


Figura 7-4

Diagrama de límite de conformación para distintos materiales. (Fuente: reimpreso de Metals Handbook—Desk Edition, 2a. ed., ASM International, Materials Park, OH 44073, p. 146, fig. 5. © 1998 ASM International. Reimpreso con autorización.)

Restitución Otro punto por notar es que, cuando se deforma un material metálico con un esfuerzo mayor que su resistencia de cedencia [σ_i en la figura 7-1(d)], la deformación correspondiente a σ_i se obtiene bajando una perpendicular al eje x (punto ϵ_{total}). Se recupera una deformación igual a $(\epsilon_{\text{total}} - \epsilon_i)$ porque tiene naturaleza elástica. La *deformación elástica* que desaparece después de deformar *plásticamente* un material se llama **restitución** [Fig. 7-1(e)]. El que ocurra la restitución tiene importancia extrema en el moldeo de las carrocerías de automóviles a partir de aceros laminados y también en muchas otras aplicaciones. También se observa este efecto al procesar materiales poliméricos, por ejemplo, por extrusión. Esto es así porque muchos polímeros son viscoelásticos, como se describió en el capítulo 6.

Es posible tener en cuenta la restitución al diseñar componentes; sin embargo, su variabilidad lo dificulta. Por ejemplo, un proveedor automotriz recibe rollos de acero laminado de distintos fabricantes, y aun cuando las especificaciones de los aceros sean idénticas, la variación de restituciones en los productos de cada fabricante, o incluso entre los distintos lotes del mismo fabricante, dificulta obtener componentes trabajados en frío que tengan exactamente la misma forma y dimensiones.[5]

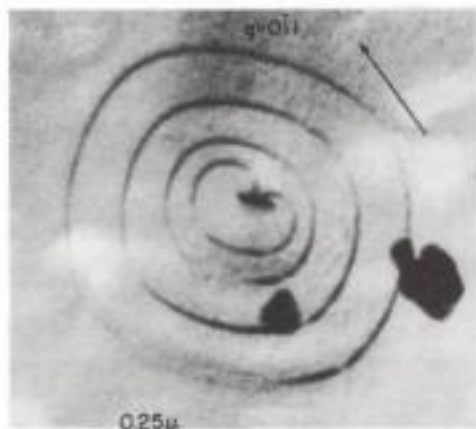
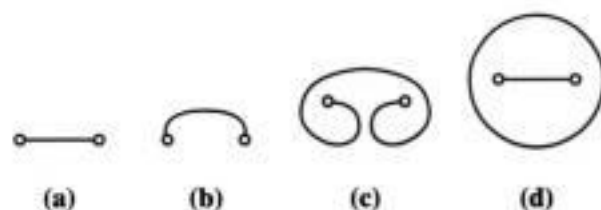
Efecto Bauschinger Imagine un material que se ha sometido a deformación plástica en tensión. Entonces, imagine dos muestras separadas de este material, *A* y *B*, que ya se ha deformado. Se ensayan las muestras *A* en tensión y *B* en compresión. Se observa que para el material deformado, el esfuerzo de fluencia en tensión ($\sigma_{\text{fluencia, tensión}}$) para la muestra *A* es mayor que el esfuerzo de fluencia en compresión ($\sigma_{\text{fluencia, compresión}}$) para la muestra *B*. Este efecto, en el cual un material que se somete a la tensión, muestra una reducción de resistencia a la compresión; se llama **efecto Bauschinger**. [6] Obsérvese que se compara el esfuerzo de cedencia de un material en compresión y en tensión, después de que el material se ha sometido a la deformación plástica bajo un esfuerzo de tensión. También se observa el efecto Bauschinger en la reversión de esfuerzos. Imagine una muestra deformada por compresión. Se pueden evaluar dos muestras separadas, *C* y *D*. La muestra sometida a un esfuerzo de compresión (*C*) indica mayor esfuerzo de fluencia que la muestra *D*, que se sometió a un esfuerzo a la tensión. El efecto Bauschinger desempeña un papel importante en el procesamiento mecánico de los aceros y otras aleaciones.

7-2 Mecanismos de endurecimiento por deformación

Durante la deformación de un material metálico, se obtiene su endurecimiento al aumentar la cantidad de dislocaciones. Antes de la deformación, la densidad aproximada de dislocaciones es de unos 10^6 cm de líneas de dislocación por centímetro cúbico de metal; es una concentración relativamente pequeña de dislocaciones.

Al aplicar un esfuerzo mayor que la resistencia de cedencia, las dislocaciones comienzan a deslizarse (ley de Schmid, capítulo 4). Al final, una dislocación que se mueve por su plano de deslizamiento encuentra obstáculos que fijan los extremos de la línea de dislocación. Al continuar aplicando el esfuerzo, la dislocación trata de moverse, arqueándose en el centro. La dislocación se puede mover tanto que se produce un anillo (Fig. 7-5). Cuando al final la dislocación se toca a sí misma, se crea una nueva dislocación. La dislocación original sigue fija en sus extremos y puede formar más anillos de dislocación. El mecanismo para generar dislocaciones se llama **fente de Frank-Read**. La figura 7-5(e) muestra una micrografía electrónica de una fente de Frank-Read.

La densidad de dislocaciones puede aumentar hasta 10^{12} cm de línea de dislocación por centímetro cúbico de metal, durante el endurecimiento por deformación. Como se describió en el capítulo 4, el movimiento de dislocaciones es la causa del flujo plástico en los materiales metálicos; sin embargo, cuando existen demasiadas dislocaciones, éstas interfieren con sus propios movimientos. Una analogía de lo anterior es cuando demasiadas personas están en un recinto, y es difícil para ellas moverse de un lado a otro. El resultado es que aumenta la resistencia, pero se reduce la ductilidad de los materiales metálicos que se sometieron a trabajo en frío o endurecimiento por trabajo.



(e)

Figura 7-5

La fente de Frank-Read puede generar dislocaciones. (a) Una dislocación está sujeta en sus extremos por defectos de la red. (b) Al continuar moviéndose la dislocación, se arquea y finalmente se dobla sobre sí misma. (c) Por último, se forma el bucle de dislocación y (d) se forma una nueva dislocación. (e) Micrografía electrónica de una fente de Frank-Read (330 000). (Adaptado de Brittain, J., "Climb Sources in Beta Prime-NiAl", Metallurgical Transactions, vol. 6A, abril de 1975.)

Los cerámicos contienen dislocaciones e incluso se pueden endurecer por deformación en una pequeña cantidad. Sin embargo, en los cerámicos las dislocaciones no son muy móviles. Los cerámicos policristalinos también contienen porosidades. El resultado es que los cerámicos se comportan como materiales frágiles, y no es posible que tengan una deformación o un endurecimiento importante por trabajo en frío. De igual modo, los materiales con enlaces covalentes, como el silicio (Si) son demasiado frágiles para endurecerlos en forma apreciable por trabajo en frío. Los vidrios son amorfos y no contienen dislocaciones; por consiguiente, no pueden endurecerse por deformación.

Los **polímeros termoplásticos** son aquellos como el polietileno, poliestireno y nylon. Esos materiales están formados por moléculas que son cadenas largas semejantes a espaguetis. Los termoplásticos se fortalecen al deformarlos. Sin embargo, **no** es endurecimiento por deformación que se deba a multiplicación de dislocaciones, sino que el fortalecimiento de esos materiales implica alineación y posiblemente cristalización localizada de las moléculas largas, semejantes a cadenas. Cuando se aplica un esfuerzo mayor que la resistencia de cedencia a polímeros termoplásticos, como el polietileno, se rompen los enlaces de van der Waals (capítulo 3) entre las moléculas de cadenas distintas. Las cadenas se enderezan y se alinean en dirección del esfuerzo aplicado (Fig. 7-6). La resistencia del polímero, en especial en dirección del esfuerzo aplicado, aumenta debido al alineamiento de las cadenas poliméricas en dirección del esfuerzo aplicado. Como se explicó en los capítulos anteriores, la fabricación de las botellas de tereftalato de polietileno (PET), mediante el proceso de soplado y estirado (Fig. 3-9), implica esa cristalización inducida por esfuerzos. Los polímeros termoplásticos se fortalecen como resultado de alineaciones locales de cadenas de polímeros debido al esfuerzo aplicado. Este aumento de resistencia se observa en la curva esfuerzo-deformación unitaria de los termoplásticos normales (capítulo 6). Muchas técnicas que se emplean para el procesamiento de polímeros se parecen a las que se usan en la fabricación de materiales metálicos. Por ejemplo, la extrusión es la técnica más difundida para procesar polímeros. Aunque muchas de esas técnicas comparten semejanzas conceptuales, hay diferencias importantes entre los mecanismos por los que se endurecen los polímeros durante su procesamiento.

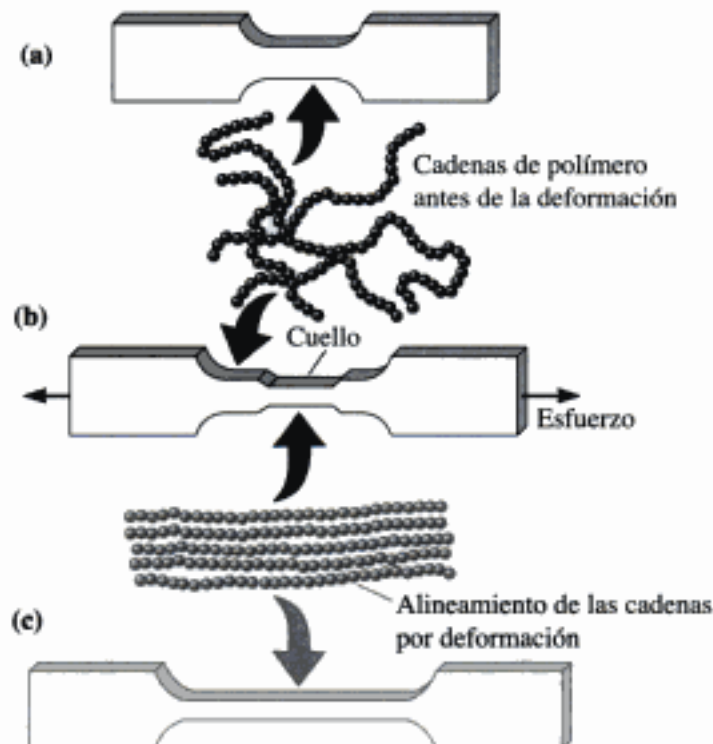


Figura 7-6
En una barra de tensión no deformada de polímero termoplástico, (a) las cadenas de polímero tienen orientación aleatoria. (b) Cuando se aplica un esfuerzo se forma un cuello a medida que las cadenas se alinean localmente. El cuello continúa creciendo hasta que las cadenas se han alineado en toda la longitud calibrada. (c) Aumenta la resistencia del polímero.

7.3

Propiedades en función del porcentaje de trabajo en frío

Si se controla la cantidad de deformación plástica, se controla el endurecimiento por deformación. Se suele medir la cantidad de deformación definiendo el **porcentaje de trabajo en frío**:

$$\text{Porcentaje de trabajo en frío} = \left[\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right] \times 100, \quad (7-4)$$

donde A_0 es el área de la sección transversal original del metal y A_f es el área de la sección transversal final después de la deformación.

El efecto del trabajo en frío sobre las propiedades mecánicas del cobre comercialmente puro se muestra en la figura 7-7. Al aumentar el trabajo en frío, la resistencia de cedencia y la resistencia a la tensión aumentan; sin embargo, la ductilidad disminuye y tiende a cero. El metal se rompe si se intenta más trabajo en frío. En consecuencia, hay una cantidad máxima de trabajo o deformación en frío que se puede hacer en un material metálico antes que se vuelva demasiado frágil y se rompa.

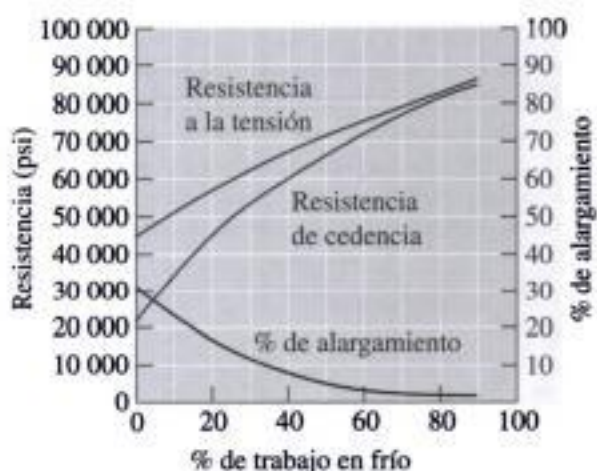


Figura 7-7
Efecto del trabajo en frío sobre las propiedades mecánicas del cobre.

EJEMPLO 7-1

Trabajo en frío de una placa de cobre

Una placa de cobre de 1 cm de grueso se reduce a 0.50 cm, y después se reduce más, hasta 0.16 cm. Calcule el trabajo en frío porcentual y la resistencia a la tensión de la placa de 0.16 cm. (Véase la Fig. 7-8.)

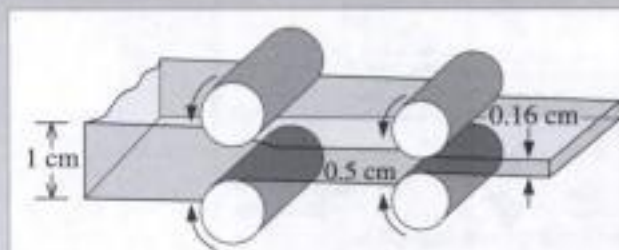


Figura 7-8
Diagrama que muestra el laminado de una placa desde 1 cm hasta 0.16 cm (para el ejemplo 7-1).

SOLUCIÓN

Obsérvese que, debido a que el ancho de la placa no cambia durante la laminación, el trabajo en frío se puede expresar como porcentaje de reducción de espesor t .

Podríamos tratar de determinar la cantidad de trabajo en frío (TF) efectuada en cada paso, esto es:

$$\% \text{ TF} = \left[\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right] \times 100 = \left[\frac{t_0 - t_f}{t_0} \right] \times 100 = \left[\frac{1 \text{ cm} - 0.50 \text{ cm}}{1 \text{ cm}} \right] \times 100 = 50\%$$

$$\% \text{ TF} = \left[\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right] \times 100 = \left[\frac{t_0 - t_f}{t_0} \right] \times 100 = \left[\frac{0.50 \text{ cm} - 0.16 \text{ cm}}{0.50 \text{ cm}} \right] \times 100 = 68\%$$

Después podríamos tratar de combinar los dos porcentajes de trabajo en frío (50% + 68% = 118%) para obtener el trabajo en frío total. *Esto sería incorrecto.*

La definición de trabajo en frío es el cambio porcentual entre las áreas transversales original y final; no existe diferencia debida a la cantidad de pasos intermedios que haya. Así, el trabajo en frío total es en realidad

$$\% \text{ TF} = \left[\frac{t_0 - t_f}{t_0} \right] \times 100 = \left[\frac{1 \text{ cm} - 0.16 \text{ cm}}{1 \text{ cm}} \right] \times 100 = 84\%$$

y, de acuerdo con la figura 7-7, la resistencia aproximada a la tensión es de 82 000 psi.

Se pueden predecir las propiedades de un metal o una aleación si se conoce la cantidad de trabajo en frío durante su procesamiento. Entonces se puede decidir si el componente tiene una resistencia adecuada en sus lugares críticos.

Cuando se desea seleccionar un material para un componente que requiera ciertas propiedades mecánicas mínimas, se puede diseñar el proceso de deformación. Primero se determina el trabajo en frío porcentual necesario y, después, con las dimensiones finales que se desean, calcular las dimensiones originales del metal, a partir de la ecuación del trabajo en frío.

EJEMPLO 7-2**Diseño de un proceso de trabajo en frío**

Diseñe un proceso de manufactura para producir una lámina de cobre de 0.1 cm de grueso que tenga como mínimo 65 000 psi de resistencia a la tensión, 60 000 psi de resistencia de cedencia y 5% de alargamiento.

SOLUCIÓN

De acuerdo con la figura 7-7, se necesita cuando menos 35% de trabajo en frío para producir 65 000 psi de resistencia a la tensión, y 40% de trabajo en frío para obtener una resistencia de cedencia de 60 000 psi; pero se necesita menos que 45% de trabajo en frío para cumplir con el requisito de 5% de alargamiento. En consecuencia, todo trabajo en frío entre 40 y 45% produce las propiedades mecánicas que se requieren.

Para producir la lámina sería adecuado un proceso de laminación en frío. El espesor original de la placa de cobre antes de laminarla se puede calcular con la ecuación 7-4, suponiendo que no cambia el ancho de la placa. Como hay un intervalo de trabajo en frío admisible, entre 40 y 45%, hay un intervalo de espesores iniciales de placa.

$$\% TF_{\min} = 40 = \left[\frac{t_{\min} \text{ cm} - 0.1 \text{ cm}}{t_{\min} \text{ cm}} \right] \times 100, \therefore t_{\min} = 0.167 \text{ cm}$$

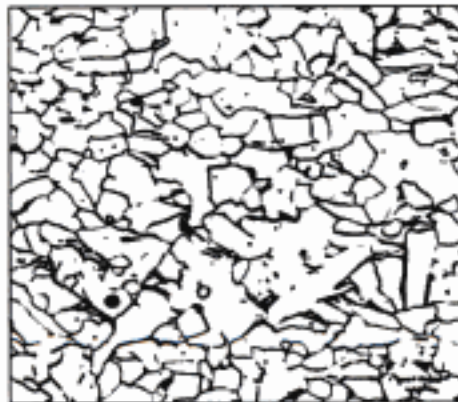
$$\% TF_{\max} = 45 = \left[\frac{t_{\max} \text{ cm} - 0.1 \text{ cm}}{t_{\max} \text{ cm}} \right] \times 100, \therefore t_{\max} = 0.182 \text{ cm}$$

Para producir la lámina de cobre de 0.1 cm, se comienza con una lámina de cobre de 0.167 a 0.182 cm de espesor en el estado más suave posible, y a continuación se lamina en frío de 40 a 45% para lograr el espesor de 0.1 cm.

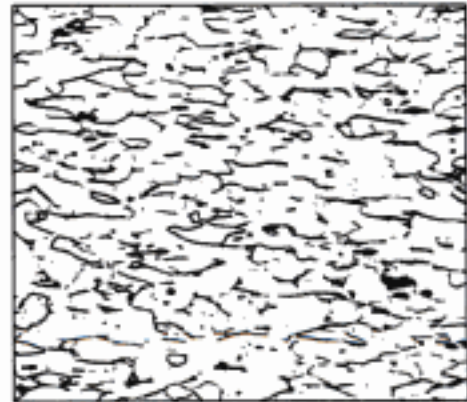
74

Microestructura, endurecimiento por textura y esfuerzos residuales

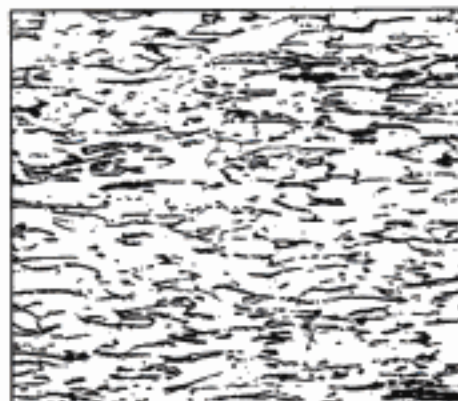
Durante la deformación plástica con trabajo en frío o en caliente, se produce con frecuencia una microestructura formada por granos alargados en dirección del esfuerzo aplicado (Fig. 7-9).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7-9 Estructura de grano fibroso de un acero al bajo carbono, producida por el trabajo en frío: (a) 10% de trabajo en frío, (b) 30% de trabajo en frío, (c) 60% de trabajo en frío y (d) 90% de trabajo en frío (250×). (Fuente: De ASM Handbook vol. 9, Metallography and Microstructure, 1985, ASM International, Materials Park, OH 44073. Se reproduce con autorización.)

Comportamiento anisotrópico Durante la deformación, los granos giran a la vez que se alargan, haciendo que ciertas direcciones y planos cristalográficos se alineen con la dirección en la que se aplica el esfuerzo. En consecuencia, se desarrollan orientaciones o texturas preferidas y causan comportamientos anisotrópicos.

En procesos como el estirado de alambres y la extrusión, se produce una **estructura de fibra** o fibrilar. El término "fibras" indica los granos en el material metálico, que se vuelven alargados en una dirección paralela al eje del alambre o de un producto extruido. En los metales BCC, las direcciones $\langle 110 \rangle$ se alinean con el eje del alambre. En los metales FCC se alinean las direcciones $\langle 111 \rangle$ o $\langle 100 \rangle$. Así se obtiene la máxima resistencia a lo largo del eje del alambre o del extruido (el producto que se extruye, como por ejemplo, un tubo), y eso es lo que se desea.

Como se mencionó antes, se observa un efecto un poco parecido en los materiales termoplásticos cuando se extruyen en fibras u otras formas. La causa, como se dijo antes, es que se alinean las cadenas de polímero, lado a lado, a lo largo de la longitud de la fibra; como en los materiales metálicos, la resistencia es máxima a lo largo del eje de la fibra polimérica. Esta clase de endurecimiento se observa también en las botellas de plástico PET moldeadas por soplado y estirado (capítulo 3). Este proceso provoca una alineación de las cadenas de polímero en las direcciones radial y longitudinal lo cual aumenta la resistencia de dichas botellas a lo largo de esas direcciones.

En procesos como el laminado, los granos se orientan en una dirección y en un plano cristalográfico preferido, dando una **textura laminar**. Las propiedades de una lámina o placa laminada dependen de la dirección en que se mide la propiedad. La figura 7-10 es un resumen de las propiedades de una aleación aluminio-litio (Al-Li) trabajada en frío en tensión. Para esta aleación, la resistencia es máxima en dirección paralela a la de laminado, mientras que la ductilidad es máxima en un ángulo de 45° con la dirección de laminado. El endurecimiento

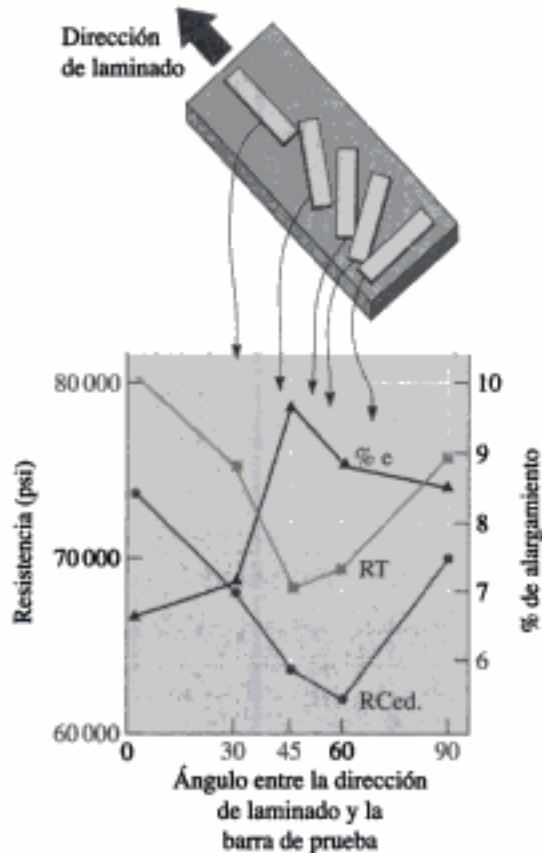


Figura 7-10

Comportamiento anisotrópico en un material laminado de aluminio-litio usado en aplicaciones aeroespaciales. El esquema muestra la relación de las barras de tensión y las propiedades mecánicas que se obtienen.

TABLA 7-2 ■ *Estirado y extrusión de alambre común y texturas foliares en los materiales*[8]

Estructura cristalina	Estirado y extrusión de alambre (estructura fibrosa) (Dirección paralela al eje del alambre)	Textura foliar o de laminado
FCC	$\langle 111 \rangle$ y $\langle 100 \rangle$	Planos $\{110\}$ paralelos al plano de laminación Direcciones $\langle 112 \rangle$ paralelas a la dirección de laminado
BCC	$\langle 110 \rangle$	Planos $\{001\}$ paralelos al plano de laminación Direcciones $\langle 110 \rangle$ paralelas a la dirección de laminado
HCP	$\langle 10\bar{1}0 \rangle$	Planos $\{0001\}$ paralelos al plano de laminación Direcciones $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ paralelas a la dirección de laminado

que se obtiene por el desarrollo de anisotropía o de una textura, se conoce como **endurecimiento por textura**. Como se hizo notar en el capítulo 6, el módulo de Young de los materiales también depende de las direcciones cristalográficas. Por ejemplo, el módulo de Young del hierro en las direcciones $[111]$ y $[100]$ es ~ 260 , y 140 GPa, respectivamente.[1] La dependencia de la resistencia de cedencia y la textura es todavía mayor. El desarrollo de la textura no sólo tiene efectos sobre las propiedades mecánicas de los materiales, sino también sobre las propiedades magnéticas y otras más. Por ejemplo, los aceros magnéticos con grano orientado hechos con un 3% de Si y 97% de Fe, que se usan en los núcleos de transformador, se texturizan con procesamientos termomecánicos adecuados, para optimizar sus propiedades eléctricas y magnéticas. Algunas texturas comunes de fibras (trefilado) y lámina (laminado) con diversas estructuras cristalinas se describen en la tabla 7.2.[8]

Desarrollo de textura en películas delgadas La orientación, o desarrollo de textura cristalográfica, también se presenta en las películas delgadas y se usa mucho para hacer coincidir la red con las estructuras o dominios cristalinos de un sustrato (capítulo 8). En el caso de las películas delgadas, el texturizado es con frecuencia el resultado de los mecanismos del proceso de crecimiento, y no de esfuerzos externos aplicados en forma rápida. A veces, los esfuerzos térmicos generados en el interior pueden desempeñar un papel en la determinación de la textura cristalográfica de la película delgada. Con frecuencia, se trata de obtener películas delgadas orientadas, ya que pueden ofrecer mejores propiedades eléctricas, ópticas o magnéticas. El **análisis de figura de polo**, que es una técnica basada en difracción de rayos X (capítulo 3), o una microscopía electrónica de barrido especializada, llamada **microscopía de orientación**, son las que se usan para identificar texturas en diversos materiales diseñados (películas, hojas, monocristales, etcétera).

EJEMPLO 7-3*Diseño de un proceso de estampado*

Un método de producción de ventiladores de enfriamiento de motores de automóvil y de camión es estampar las aspas en lámina de acero laminada en frío, y después fijarlas a una "araña" que sujeta a las aspas en una posición correcta. Varias aspas de ventilador, todas producidas al mismo tiempo, han fallado por la iniciación y la propagación de una grieta de fatiga transversal al eje del aspa (Fig. 7-11). Todas las demás aspas funcionaron en forma satisfactoria. Describa una explicación de la falla de las aspas y rediseñe el proceso de fabricación para evitarlas.



Figura 7-11
Orientaciones de las
muestras (para el
ejemplo 7-3).

SOLUCIÓN

Pueden darse varias explicaciones de la falla de las aspas; por ejemplo, se pudo haber seleccionado el acero inadecuado, o las matrices con que se estamparon las aspas con la lámina pudieron estar gastadas, o la holgura entre las partes de los troqueles pudo ser incorrecta y se produjeron defectos que iniciaron la falla por fatiga.

Las fallas también pudieron estar relacionadas con el comportamiento anisotrópico de la lámina de acero, debido al laminado. Para lograr el mejor funcionamiento del aspa, su eje debería estar alineado con la dirección de laminado de la lámina de acero. Este procedimiento produce una alta resistencia a lo largo del eje del aspa y, al asegurar que los granos estén alineados así, se reduce la cantidad de límites de grano a lo largo del borde de ataque del aspa, que pudieran ayudar a iniciar una grieta por fatiga. Imaginemos que el examen del aspa usando, por ejemplo, análisis de figura polar o análisis metalográfico indicara que la lámina de acero tuviera una alineación a 90° respecto a su posición normal durante el estampado. Entonces, el aspa tiene baja resistencia en la dirección crítica y, además, las grietas por fatiga se iniciarán y crecerán con más facilidad. Esta falla en la manufactura puede causar fallas, así como lesiones a los mecánicos que den mantenimiento a los automóviles.

Se recomendaría rediseñar el proceso de manufactura para asegurar que las aspas no se puedan estampar en lámina desalineada. Quizá con guías o seguros especiales en el dado se asegure que éste quede alineado en forma correcta con la lámina.

Esfuerzos residuales Una pequeña proporción del esfuerzo aplicado, quizás un 10%, se almacena en forma de **esfuerzos residuales** o esfuerzos internos, dentro de la estructura, en forma de una maraña de dislocaciones. Los esfuerzos residuales aumentan la energía total de la estructura. La presencia de dislocaciones aumenta la energía total de la estructura. Cuanto mayor sea la cantidad de trabajo en frío, mayor será la cantidad total de energía interna del material. Los esfuerzos residuales generados por el trabajo en frío no siempre son deseables, y se pueden eliminar por un tratamiento térmico llamado **recocido de relevo de esfuerzos** (sección 7-6). Como se describirá en breve, en algunos casos se crean en forma deliberada esfuerzos residuales de compresión en la superficie de los materiales para mejorar sus propiedades mecánicas.

Los esfuerzos residuales no son uniformes dentro del material metálico deformado. Por ejemplo, puede haber grandes esfuerzos residuales de compresión en la superficie de una placa laminada, y en el centro de ella puede haber almacenados grandes esfuerzos de tensión. Si se maquina una pequeña cantidad de metal de la superficie de una parte trabajada en frío, se elimina el metal que sólo contiene esfuerzos residuales de compresión. Para restaurar el equilibrio, se debe distorsionar la placa. Si hay un esfuerzo neto residual de compresión en la superficie de un componente, puede ser benéfico desde el punto de vista de las propiedades mecánicas, porque

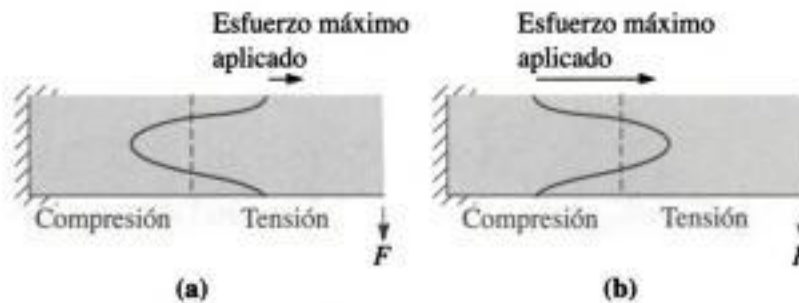


Figura 7-12 Los esfuerzos residuales pueden ser perjudiciales o benéficos. (a) Una fuerza de flexión aplica un esfuerzo de tensión en la parte superior de la viga en voladizo. Como ahí ya existen esfuerzos residuales de tensión, las características de capacidad de carga son malas. (b) la parte superior tiene esfuerzos residuales de compresión. En este caso las características de capacidad de carga son muy buenas.

lo más probable es que toda grieta o imperfección en la superficie no crecerá. Es la explicación de que todo esfuerzo residual de compresión que se origina por trabajo en frío, o por cualquier otra causa, afecta la capacidad de la parte para sostener una carga (Fig. 7-12). Si se aplica un esfuerzo de tensión a un material que ya contiene esfuerzos residuales de tensión, el esfuerzo total sobre la parte es la suma de los esfuerzos aplicado y residual. Sin embargo, si en la superficie de la parte metálica hay almacenados esfuerzos de compresión, un esfuerzo aplicado de tensión debe primero contrarrestar los esfuerzos residuales de compresión. Entonces, la parte puede ser capaz de resistir una carga mayor que la normal. En el capítulo 6 vimos que la fatiga es un mecanismo frecuente de falla en componentes sometidos a cargas. A veces, los componentes sometidos a falla por fatiga se pueden fortalecer mediante **granallado con municiones**. Al bombardear la superficie con municiones de acero impulsadas a gran velocidad, se introducen esfuerzos residuales de compresión en la superficie, que aumentan la resistencia de la superficie metálica contra la falla por fatiga (capítulo 6). El siguiente ejemplo explica el uso del granallado.

EJEMPLO 7-4

Diseño de un eje resistente a la fatiga

La empresa ha producido varios miles de ejes cuya resistencia a la fatiga es de 20000 psi. Los ejes se sujetan a grandes cargas de flexión cuando giran. El ingeniero de ventas informa que ya fallaron, en un tiempo corto, los primeros ejes puestos en servicio. Diseñe un proceso mediante el cual se puedan salvar los ejes que quedan, mejorando sus propiedades de fatiga.

SOLUCIÓN

Normalmente, las fallas por fatiga comienzan en la superficie de una parte rotatoria; por tanto, si se aumenta la resistencia en la superficie, se mejora la vida de fatiga del eje. Para lograrlo, podrían usarse varios métodos.

Si el eje es de acero, se podría cementar, o carburizar, la superficie de la parte (capítulo 5). En la cementación, se difunde el carbono en la superficie del eje. Después de un tratamiento térmico, el mayor contenido de carbono en la superficie aumenta la resistencia en ella y, quizá más importante, se introducen esfuerzos residuales de *compresión* en la superficie.

Se podría considerar hacer trabajo en frío en el eje; con el trabajo en frío aumenta la resistencia del material a la cedencia y, si se hace en forma correcta, se introducen esfuerzos residuales. Sin embargo, en el trabajo en frío también se reduce el diámetro del eje y, debido al cambio en las dimensiones, podría suceder que el eje no pueda desempeñar su función.

Una alternativa sería la de granallar el eje. El granallado introduce esfuerzos residuales de compresión en la superficie sin cambiar las dimensiones de la parte. Este proceso, que además es poco costoso, podría ser suficiente para salvar los ejes restantes.

Templado y recocido de vidrios Los esfuerzos residuales que se originan durante el enfriamiento de los vidrios también son de gran interés. Se pueden manejar esfuerzos residuales en los vidrios en dos formas. La primera es recalentar el vidrio a una temperatura alta, llamada **temperatura de recocido** ($\sim 450^\circ\text{C}$ para los vidrios de silicato con viscosidad de $\sim 10^{13}$ poises), y dejarlo enfriar con lentitud, para que el exterior y el interior se enfríen con la misma rapidez. A este proceso se le llama **recocido**, y el vidrio que se logra casi no tiene esfuerzos y se llama **vidrio recocido**. El objetivo de recocer los vidrios y del proceso llamado relevo de esfuerzos en los materiales metálicos es el mismo: eliminar o disminuir en forma apreciable el valor de los esfuerzos residuales. Sin embargo, el origen de los esfuerzos residuales es distinto en esos materiales. Otra opción que hay en el procesamiento del vidrio es hacer un tratamiento térmico que cause esfuerzos de compresión en la superficie de un vidrio; a esto se le llama **templado** (sólo en los vidrios; es distinto del templado o temple de metales). El vidrio templado se obtiene calentando el vidrio a una temperatura justo abajo del punto de recocido, y después dejando que se enfríe más rápidamente la superficie que el centro, en forma deliberada. Eso conduce a un esfuerzo de compresión uniforme en la superficie del vidrio. La región central se queda con un esfuerzo de tensión. También es posible intercambiar iones en la estructura vítrea, e introducir un esfuerzo de compresión. A esto se le llama **templado químico**. En el capítulo 6 vimos que la resistencia del vidrio depende de que haya imperfecciones en la superficie. Si se tiene un esfuerzo de compresión en la superficie y un esfuerzo de tensión en el centro (de modo que el esfuerzo general sea cero), la resistencia del vidrio se mejora en forma notable. Cualquier microgrieta que exista no crecerá con facilidad, por la presencia de un esfuerzo de compresión neto en la superficie. Sin embargo, si se le somete a un gran impacto, entonces la grieta sí penetra hasta la región donde los esfuerzos son de tensión y el vidrio se estrella.

El vidrio templado tiene muchos usos. Por ejemplo, los vidrios laterales y los traseros de los automóviles se hacen con vidrio templado. En aplicaciones como en pantallas de chimenea, hornos, anaqueles, muebles y refrigeradores también se usa el vidrio templado. Para los parabrisas de los automóviles, se usa un **vidrio laminado de seguridad**. El vidrio de los parabrisas se hace con dos piezas de vidrio recocido, laminadas en su interior con un plástico llamado polivinil butiral (*PVB*). Este plástico ayuda a sujetar los trozos de vidrio. Si se rompe el parabrisas, las piezas de vidrio laminado se mantienen unidas debido al plástico *PVB*. Esto ayuda a minimizar las lesiones al conductor y a los pasajeros. También, al usar vidrio laminado de seguridad se reducen las probabilidades de que los trozos de vidrio corten la tela de las bolsas de aire que, posiblemente, se inflen en forma simultánea con la rotura del vidrio.

7-5

Características del trabajo en frío

Hay varias ventajas y limitaciones al endurecimiento de un material metálico por trabajo en frío o endurecimiento por deformación.

- Se puede endurecer el material metálico y al mismo tiempo obtener la forma final que se desee.

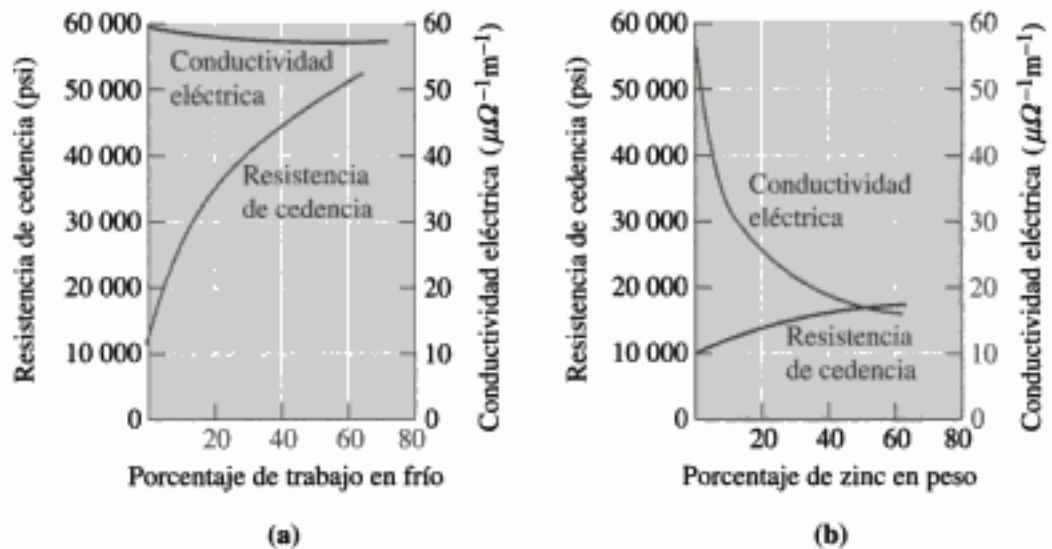


Figura 7-13 (a) Comparación del endurecimiento del cobre por (a) trabajo en frío y (b) aleación con zinc. Obsérvese que el trabajo en frío produce mayor endurecimiento, pero tiene poco efecto sobre la conductividad eléctrica.

- Se pueden obtener tolerancias dimensionales y acabados superficiales excelentes mediante el proceso de trabajo en frío.
- El proceso de trabajo en frío es un método poco costoso para producir grandes cantidades de partes pequeñas, porque no se necesitan grandes fuerzas ni costosos equipos de conformación. Tampoco se necesitan elementos de aleación, lo que significa que se pueden usar materias primas de menor costo.
- Algunos metales, como el magnesio HCP, tienen una cantidad limitada de sistemas de deslizamiento y son bastante frágiles a temperatura ambiente; entonces, sólo se les puede hacer poco trabajo en frío.
- El trabajo en frío perjudica la ductilidad, la conductividad eléctrica y la resistencia a la corrosión. Sin embargo, como el grado en que el trabajo en frío reduce la conductividad eléctrica es menor que en otros procesos de endurecimiento, como introducir elementos aleantes (Fig. 7-13), el trabajo en frío es una forma satisfactoria de fortalecer los materiales conductores, como los alambres de cobre que se usan para transmitir la energía eléctrica.
- Los esfuerzos residuales y el comportamiento anisotrópico pueden ser benéficos, si se controlan en forma adecuada. Sin embargo, si no se controlan bien, las propiedades del material quedan muy perjudicadas.
- Como se verá en la sección 7-6, como el efecto del trabajo en frío disminuye o se elimina a temperaturas mayores, no se puede usar como mecanismo de endurecimiento para componentes que estarán sujetos a altas temperaturas durante la aplicación o el servicio.
- Algunas técnicas de procesamiento por deformación sólo se pueden lograr si hay trabajo en frío. Por ejemplo, el estirado de alambre requiere tirar de una varilla a través de un dado para producir una sección transversal de área menor (Fig. 7-14). Para determinada fuerza de tensión F_{σ} , se produce un esfuerzo distinto en el alambre original y en el final. El esfuerzo en el alambre inicial debe ser mayor que la resistencia del material a la cedencia, para causar la deformación. El esfuerzo sobre el alambre final debe ser menor que su resistencia de cedencia, para evitar su falla. Eso sólo se logra si el alambre se endurece por deformación durante su trefilado.

$$\text{Esfuerzo} = \frac{F_d}{\frac{\pi}{4}d_0^2} > \text{Resistencia original de cedencia} \quad \text{Esfuerzo} = \frac{F_d}{\frac{\pi}{4}d_f^2} < \text{Resistencia final de cedencia}$$


Figura 7-14 Proceso de estirado de alambre. La fuerza F_d actúa sobre los diámetros original y final. Entonces, el esfuerzo producido en el alambre final es mayor que en el original. Si el alambre no se endureciera por deformación durante el estirado, podría romperse en la operación.

EJEMPLO 7-5

Diseñar un proceso de estirado de alambre

Diseñe un proceso para producir alambre de cobre de 0.20 pulg de diámetro. Se debe suponer que las propiedades mecánicas del cobre son como las que se muestran en la figura 7-7.

SOLUCIÓN

El estirado de alambre es la técnica de manufactura obvia para esta aplicación. Para producir el alambre de cobre en la forma más eficiente posible, se hace la máxima reducción posible en el diámetro. Nuestro diseño debe asegurar que el alambre se endurezca por deformación lo suficiente durante el estiramiento, para evitar que se rompa.

Como en el cálculo del ejemplo, supongamos que el diámetro inicial del alambre de cobre es de 0.40 pulg, y que el alambre está en la condición más suave posible. El trabajo en frío (TF) es:

$$\begin{aligned} \%TF &= \left[\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right] \times 100 = \left[\frac{(\pi/4)d_0^2 - (\pi/4)d_f^2}{(\pi/4)d_0^2} \right] \times 100 \\ &= \left[\frac{(0.40 \text{ pulg})^2 - (0.20 \text{ pulg})^2}{(0.40 \text{ pulg})^2} \right] \times 100 = 75\% \end{aligned}$$

De acuerdo con la figura 7-7, la resistencia inicial de cedencia con 0% de trabajo en frío es de 22 000 psi. La resistencia final de cedencia con 75% de trabajo en frío es de 77 500 psi, aproximadamente (con muy poca ductilidad). La fuerza de tensión necesaria para deformar el alambre inicial es:

$$F = \sigma_y A_0 = (22\,000 \text{ psi}) (\pi/4) (0.40 \text{ pulg})^2 = 2765 \text{ lb}$$

El esfuerzo que actúa sobre el alambre después de pasarlo por el troquel es:

$$\sigma = \frac{F_d}{A_f} = \frac{2765 \text{ lb}}{(\pi/4)(0.20 \text{ pulg})^2} = 88\,010 \text{ psi}$$

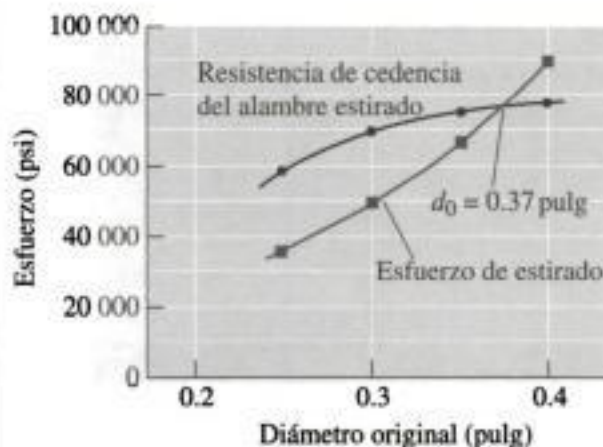
El esfuerzo aplicado de 88 010 psi es mayor que la resistencia de cedencia de 77 500 psi, del alambre estirado. En consecuencia, el alambre se rompe.

Se puede hacer el mismo conjunto de cálculos con otros diámetros iniciales y obtener los resultados de la tabla 7-3 y de la figura 7-15.

La gráfica indica que el esfuerzo de estirado es mayor que la resistencia de cedencia del alambre estirado cuando el diámetro original aproximado es de 0.37 pulg. Para producir el alambre en la forma más eficiente posible, el diámetro original debería ser un poco menor que 0.37 pulg.

TABLA 7-3 ■ Propiedades mecánicas del alambre de cobre (véase el ejemplo 7-5)

d_0 (pulg)	% TF	Resistencia de cedencia del alambre estirado (psi)	Fuerza (lb)	Esfuerzo en el alambre estirado (psi)
0.25	36	58 000	1080	34 380
0.30	56	68 000	1555	49 500
0.35	67	74 000	2117	67 390
0.40	75	77 500	2765	88 010

Figura 7-15
Resistencia de cedencia y esfuerzo de estirado en el alambre (para el ejemplo 7-5).

7-6

Las tres etapas del recocido

El trabajo en frío es un mecanismo útil de endurecimiento; también es una herramienta muy eficaz para conformar materiales mediante trefilado, laminado, extrusión, etc. Sin embargo, el trabajo en frío causa algunos efectos que a veces no se desean. Por ejemplo, la pérdida de ductilidad o el desarrollo de esfuerzos residuales podrán no ser adecuados en algunas aplicaciones. Como el trabajo en frío o el endurecimiento por deformación se debe a una mayor densidad de dislocaciones, se puede suponer que cualquier tratamiento para reordenar o aniquilar las dislocaciones podría comenzar a deshacer los efectos del trabajo en frío.

El **recocido** es un tratamiento térmico para eliminar algunos o todos los efectos del trabajo en frío. Se puede usar el recocido a baja temperatura para eliminar los esfuerzos residuales que se producen durante el trabajo en frío, sin afectar las propiedades mecánicas de la parte terminada; también se puede usar para eliminar por completo el endurecimiento por deformación que se desarrolla durante el trabajo en frío. En este caso, la parte obtenida es suave y dúctil, pero sigue teniendo un buen acabado superficial y exactitud dimensional. Después de recocer, podría hacerse más trabajo en frío, porque se restituye la ductilidad; al combinar ciclos repetidos de trabajo en frío y recocido, se pueden alcanzar deformaciones totales grandes. Hay tres etapas posibles en el proceso de recocido; en la figura 7-16 se muestran sus efectos sobre las propiedades de un latón.

Obsérvese que el término "recocido" también se usa para describir otros tratamientos térmicos. Por ejemplo, los vitrocerámicos pueden recocerse, o tratarse térmicamente, para eliminar esfuerzos residuales. Los hierros y los aceros colados se pueden recocer para producir la

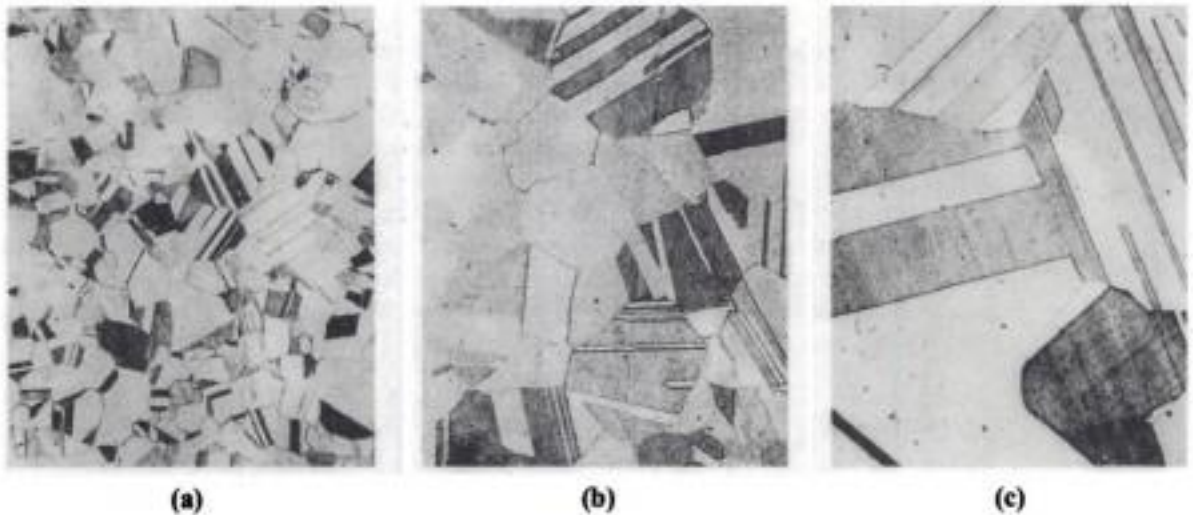


Figura 7-16 Fotomicrografías que muestran el efecto de la temperatura de recocido sobre el tamaño del grano en el latón. También se pueden observar límites de macia en las estructuras. (a) Recocido a 400 °C, (b) recocido a 650 °C y (c) recocido a 800 °C (75x). (Adaptado de Brick, R. y Phillips, A., *The Structure and Properties of Alloys*, McGraw-Hill, 1949.)

ductilidad máxima, aunque no se haya hecho trabajo en frío con anterioridad en el material. Estos tratamientos térmicos de recocido se describirán en capítulos posteriores.

Recuperación La microestructura original con trabajo en frío se compone de granos deformados que contienen una gran cantidad de dislocaciones enredadas. Cuando calentamos inicialmente el metal, la energía térmica permite que las dislocaciones se muevan y formen las fronteras de una **estructura subgranular poligonizada** (Fig. 7-17). Sin embargo, la densidad de dislocaciones virtualmente no cambia. Este tratamiento a baja temperatura elimina los esfuerzos residuales causados por el trabajo en frío, sin causar un cambio en la densidad de dislocaciones, y se llama **recuperación**.

Las propiedades mecánicas del metal permanecen casi inalteradas, porque la cantidad de dislocaciones no se reduce durante la recuperación. Sin embargo, los esfuerzos residuales se reducen, o incluso se eliminan, cuando se rearreglan las dislocaciones; con frecuencia a la recuperación se le llama **recocido de eliminación de esfuerzos**, recocido de relevo de esfuerzos o simplemente relevo de esfuerzos. Además, la recuperación restablece la alta conductividad eléctrica al metal, lo que permite fabricar alambre de cobre o aluminio para la transmisión de energía eléctrica, que sea resistente y que al mismo tiempo tenga conductividad alta. Por último, el recocido mejora con frecuencia la resistencia del material a la corrosión.

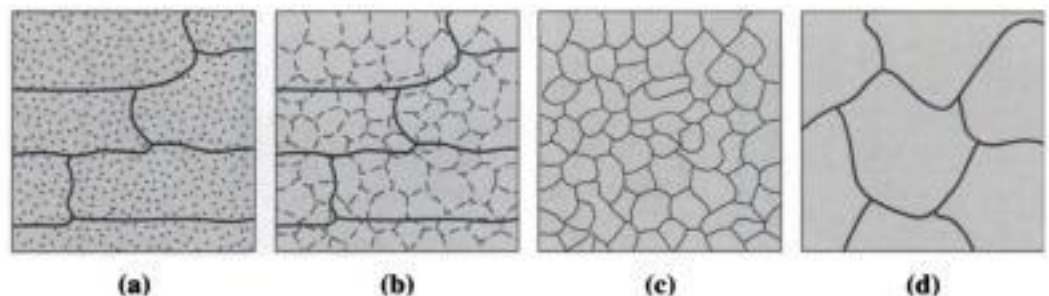


Figura 7-17 Efecto de la temperatura de recocido sobre la microestructura de los metales trabajados en frío. (a) Trabajado en frío. (b) Después de la recuperación. (c) Después de la recrystalización y (d) después del crecimiento de los granos.

Recristalización Cuando un material trabajado en frío se calienta más allá de cierta temperatura, la recuperación rápidamente elimina los esfuerzos residuales y produce la estructura polygonizada de dislocaciones. Entonces se nuclean nuevos y pequeños granos en los límites de celda de la estructura polygonizada y se elimina la mayoría de las dislocaciones (Fig. 7-17). Como se reduce mucho la cantidad de dislocaciones, el metal recristalizado tiene baja resistencia, pero gran ductilidad. La temperatura a la que aparece una microestructura de nuevos granos con muy baja densidad de dislocaciones se llama **temperatura de recristalización**. El proceso de formación de nuevos granos por tratamiento térmico de un material trabajado en frío se llama **recristalización**. Como se verá en la sección 7-7, la temperatura de recristalización depende de muchas variables y no es una temperatura fija como la temperatura de fusión de los elementos o los compuestos.

Crecimiento de grano A temperaturas de recocido todavía mayores, la recuperación y la recristalización se efectúan con rapidez y se produce una estructura granular recristalizada fina. Si la temperatura es suficientemente alta, como se describió en el capítulo 5, los granos comienzan a crecer, y unos granos favorecidos consumen a los más pequeños (Fig. 7-16). Este fenómeno se llama **crecimiento de grano**, y está impulsado por la reducción del área de los límites de grano que se describió en el capítulo 5. El diagrama de la figura 7-18 muestra, para una aleación de cobre-zinc, el crecimiento de grano, que en este caso casi siempre es perjudicial. Recuérdese que el crecimiento de grano se efectúa en la mayoría de los materiales si se les somete a una temperatura suficientemente alta y, en ese caso, no se relaciona con el trabajo en frío. Por lo anterior, ni la recristalización ni la recuperación son necesarias para que haya crecimiento de grano.

El lector habrá notado que las lámparas incandescentes contienen filamentos de tungsteno (W). La alta temperatura que causa el crecimiento de los granos es uno de los factores por los que fallan esos filamentos.

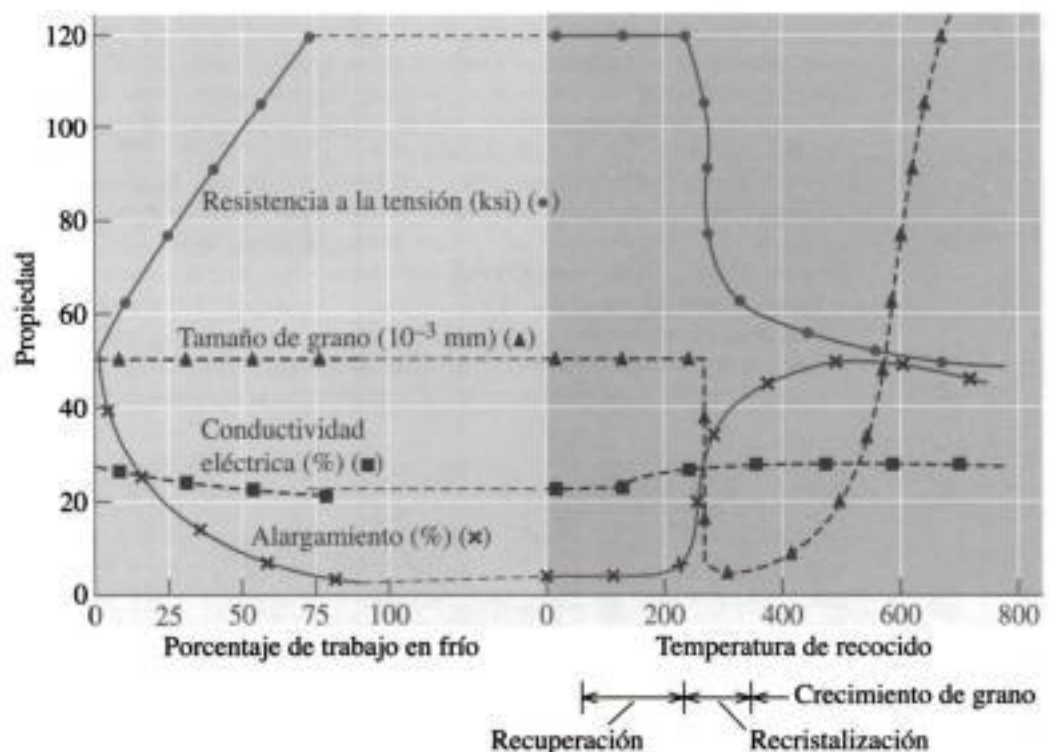


Figura 7-18 Efecto del trabajo en frío sobre las propiedades de una aleación de Cu-35% Zn y el efecto de la temperatura de recocido sobre las propiedades de esta aleación que se había trabajado 75% en frío.

Los materiales cerámicos, que normalmente no presentan endurecimiento por deformación, sí presentan crecimiento de grano extenso (capítulo 5). También puede presentarse crecimiento anormal de grano en algunos materiales, debido a la formación de fase líquida durante su sinterización (capítulo 14). Un ejemplo donde el crecimiento de grano es benéfico es la aplicación de la cerámica de alúmina para fabricar los materiales ópticos que se usan en el alumbrado. En esta aplicación se desea tener granos muy grandes, porque se debe reducir al mínimo la dispersión de la luz en los límites de grano. Algunos investigadores han desarrollado también métodos para hacer crecer monocristales de materiales cerámicos, a través de crecimientos de grano.

7-7

Control del recocido

En muchas aplicaciones con materiales metálicos, se necesita una combinación de resistencia y tenacidad. En consecuencia, se deben diseñar procesos que impliquen moldeo por trabajo en frío. A continuación se debe controlar el proceso de recocido para obtener un grado de ductilidad. Para diseñar un tratamiento térmico adecuado para el recocido, es necesario conocer la temperatura de recrystalización y el tamaño de los granos recrystalizados.

Temperatura de recrystalización Es la temperatura a la que los granos de la microestructura trabajada en frío comienzan a transformarse en nuevos granos, equiaxiales y sin dislocaciones. La fuerza motriz para la recrystalización es la diferencia entre la energía interna de un material frío y la de un material recrystalizado. Es importante enfatizar que la temperatura de recrystalización *no es* una temperatura fija, como la temperatura de fusión de un elemento puro, y está influida por una diversidad de variables de procesamiento:

- * La temperatura de recrystalización disminuye cuando aumenta la cantidad de trabajo en frío. Las mayores cantidades de trabajo en frío hacen que el metal sea menos estable y promueven la nucleación de granos recrystalizados. Hay una cantidad mínima de trabajo en frío, entre 30 y 40%, abajo de la cual no ocurrirá la recrystalización.
- * Un menor tamaño de grano original trabajado en frío reduce la temperatura de recrystalización, al proporcionar más sitios, que eran los límites de grano anteriores, en los cuales se pueden nuclear nuevos granos.
- * Los metales puros se recrystalizan a menores temperaturas que las aleaciones.
- * Al aumentar el tiempo de recocido se reduce la temperatura de recrystalización (Fig. 7-19), ya que se dispone de más tiempo para la nucleación y el crecimiento de los nuevos granos recrystalizados.
- * Una mayor temperatura de fusión permite alcanzar una mayor temperatura de recrystalización. Como la recrystalización es un proceso controlado por difusión, la temperatura de recrystalización es proporcional, más o menos, a $0.4 T_m$ en grados kelvin. Las temperaturas comunes de recrystalización de algunos metales se muestran en la tabla 7-4.

El concepto de temperatura de recrystalización es muy importante, porque define también el límite entre el trabajo en frío y el trabajo en caliente de un material metálico. Si se hace una deformación (formado) de un material arriba de la temperatura de recrystalización, se llama trabajo en caliente. Si el formado o deformación se hacen abajo de la temperatura de recrystalización, se llama trabajo en frío. En consecuencia, los términos de trabajo en "caliente" y en "frío" indican si el proceso de conformación se hace a temperaturas mayores o menores que la temperatura de recrystalización. Como se puede observar en la tabla 7-4, cuando el plomo

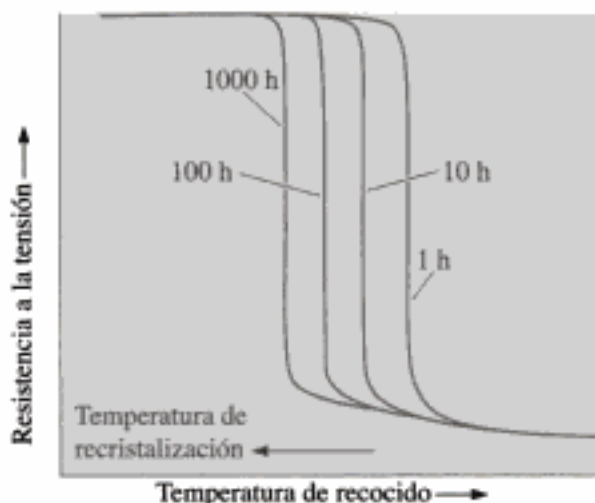


Figura 7-19

Los tiempos más largos de recocido reducen la temperatura de recristalización. Se debe considerar que la temperatura de recristalización no es una temperatura fija.

(Pb) o el estaño (Sn) se deforman a 25 °C ¡se trata de trabajo en caliente! Es la causa por la cual el hierro (Fe) se puede trabajar en frío a la temperatura ambiente, pero no el plomo (Pb). Para el tungsteno, que se deforma a 1000 °C, se trata de trabajo en frío. En algunos casos se considera como trabajo en caliente un proceso efectuado a más de 0.6 veces la temperatura de fusión (T_m) del metal (en K). Los procesos efectuados a menos de 0.3 veces la temperatura de fusión se consideran trabajo en frío, y los efectuados entre 0.3 y 0.6 T_m se consideran **trabajo en tibio**. [9] Sin embargo, estas descripciones que definen el trabajo en caliente, en frío o en tibio son aproximadas y se deben usar con precaución.

Tamaño del grano recristalizado Hay varios factores que influyen sobre el tamaño de los granos recristalizados. Al reducir la temperatura de recocido el tiempo necesario para lle-

TABLA 7-4 ■ Temperaturas comunes de recristalización de algunos materiales

Metal	Temperatura de fusión (°C)	Temperatura de recristalización (°C)
Sn	232	-4
Pb	327	-4
Zn	420	10
Al	660	150
Mg	650	200
Ag	962	200
Cu	1085	200
Fe	1538	450
Ni	1453	600
Mo	2610	900
W	3410	1200

(Fuente: Adaptada de Structure and Properties of Engineering Materials, por R. Brick, A. Pense y R. Gordon, 1977. Copyright © 1977. The McGraw-Hill Companies. Reproducido con autorización.)

gar a ella, o el tiempo de recocido, se reduce el tamaño de grano, porque se minimiza la oportunidad de que crezca el grano. Si se aumenta el trabajo en frío inicial también se reduce el tamaño final del grano, porque se proporciona mayor cantidad de sitios para nuclear nuevos granos. Por último, la presencia de una segunda fase en la microestructura ayuda a evitar el crecimiento de los granos y mantiene pequeño el tamaño del grano recrystalizado.

7-8

Recocido y procesamiento de materiales

Los efectos de la recuperación, recrystalización y tamaño de grano son importantes para procesar y para el uso final de un metal o una aleación.

Proceso de deformación Si se aprovecha el tratamiento térmico de recocido, se puede aumentar el grado total de deformación que se puede lograr. Si se pide reducir una placa de 5 pulg de espesor a una lámina de 0.05 pulg de espesor, se puede efectuar el trabajo en frío máximo admisible, recocer para regresar el metal a su estado suave y dúctil y entonces trabajarlo de nuevo en frío. Se puede repetir el ciclo de trabajo en frío-recocido hasta obtener el espesor final. El último paso de trabajo en frío se debe diseñar para obtener las dimensiones y las propiedades finales que se requieran (ejemplo 7-6).

EJEMPLO 7-6

Diseño de un proceso para producir banda de cobre

Deseamos producir una cinta de cobre de 0.1 cm de espesor y 6 cm de ancho, que tenga al menos 60 000 psi de resistencia de cedencia y al menos 5% de alargamiento. Se pueden comprar barras de 6 cm de ancho sólo en espesores de 5 cm. Diseñe un proceso para obtener el producto deseado.

SOLUCIÓN

En el ejemplo 7-2, vimos que las propiedades necesarias se pueden obtener con un trabajo en frío de 40 a 45%. Por consiguiente, el espesor inicial debe estar entre 0.167 cm y 0.182 cm, y este material inicial debe ser tan suave como sea posible; es decir, debe estar recocido. Como sólo se puede comprar material de 5 cm de espesor, debemos reducir el grosor hasta entre 0.167 a 0.182 cm, y después recocer la banda antes del trabajo final en frío. Pero ¿podemos hacer exitosamente un buen trabajo en frío (TF) desde 5 cm hasta 0.182 cm?

$$\%TF = \left[\frac{t_o - t_f}{t_o} \right] \times 100 = \left[\frac{5 \text{ cm} - 0.182 \text{ cm}}{5 \text{ cm}} \right] \times 100 = 96.4\%$$

De acuerdo con la figura 7-7, se permite un máximo aproximado de 90% de trabajo en frío. En consecuencia, se debe hacer una serie de ciclos de trabajo en frío y recocido. Aunque hay muchas combinaciones posibles, una de ellas es la siguiente:

1. Trabajar 80% en frío la barra de 5 cm hasta 1 cm:

$$80 = \left[\frac{t_o - t_f}{t_o} \right] \times 100 = \left[\frac{5 \text{ cm} - t_f}{5 \text{ cm}} \right] \times 100 \quad \text{es decir} \quad t_f = 1 \text{ cm}$$

2. Recocer la cinta de 1 cm para restaurar la ductilidad. Si no se conoce la temperatura de recrystalización, se puede usar la ecuación de $0.4T_m$ como estimado. El punto de fusión del cobre es de 1085 °C:

$$T_r \approx (0.4)(1085 + 273) = 543 \text{ K} = 270 \text{ °C}$$

3. Trabajar en frío la cinta de 1 cm de espesor hasta 0.182 cm:

$$\%TF = \left[\frac{1 \text{ cm} - 0.182 \text{ cm}}{1 \text{ cm}} \right] \times 100 = 81.8\%$$

4. Recocer de nuevo el cobre a 270 °C para restablecer la ductilidad.
5. Por último, trabajar 45% en frío, de 0.182 cm hasta la dimensión final de 0.1 cm. Este proceso obtiene las dimensiones y propiedades finales correctas.

Servicio en alta temperatura Como se mencionó anteriormente, ni el endurecimiento por deformación ni el endurecimiento por tamaño de grano (ecuación de Hall-Petch, capítulo 4) son adecuados para una aleación que se usará a temperaturas elevadas, como por ejemplo, en aplicaciones con resistencia a la termofluencia. Cuando el metal trabajado en frío se pone en servicio a alta temperatura, la recrystalización causa de inmediato una disminución catastrófica de resistencia. Además, si la temperatura es suficientemente alta, la resistencia continúa bajando por el crecimiento de los granos recién cristalizados.

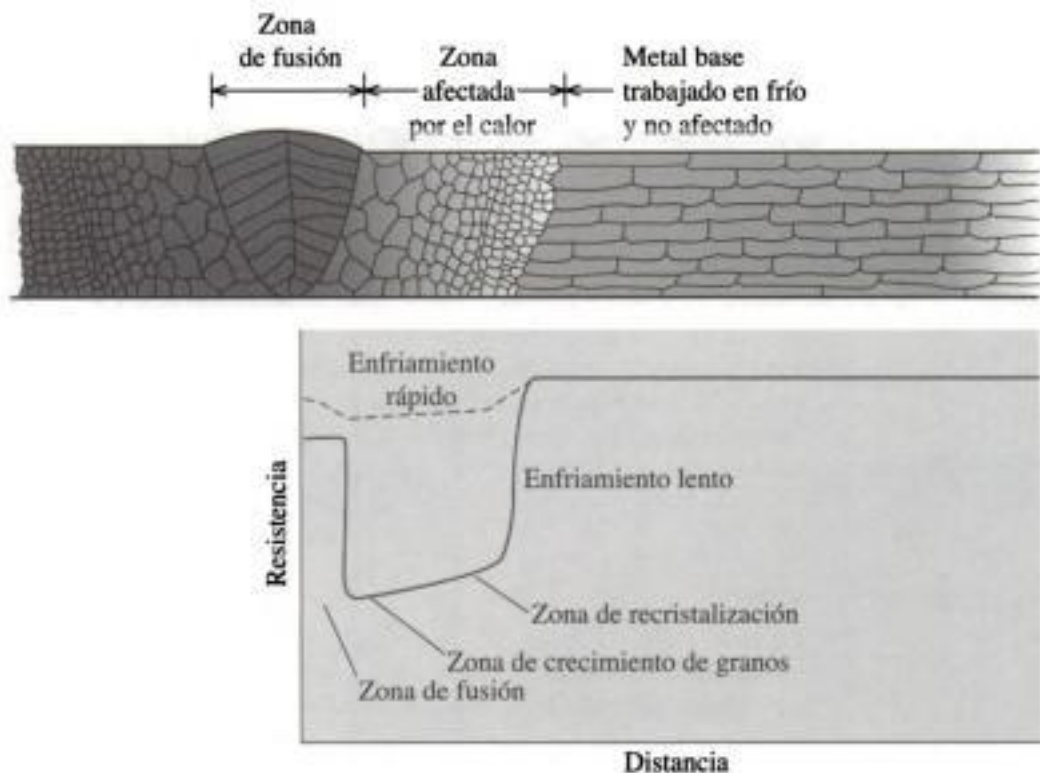


Figura 7-20 Estructura y propiedades del material que rodean a una soldadura de fusión en un metal trabajado en frío. Nota: sólo se marca en el diagrama el lado derecho de la zona afectada por el calor. Obsérvese la pérdida de resistencia causada por la recrystalización y el crecimiento de granos en la zona afectada por el calor.

Procesos de unión Los materiales metálicos se pueden unir con procesos como el de fusión.[10,11] Cuando se une un metal trabajado en frío con un proceso de soldadura, el metal adyacente al cordón se calienta a mayor temperatura que la de recrystalización y de crecimiento de grano y después se enfría lentamente. A esta región se le llama **zona afectada por el calor** (HAZ, por sus siglas en inglés). La estructura y las propiedades en la zona afectada por el calor en una soldadura se muestran en la figura 7-20. Las propiedades mecánicas se reducen en forma catastrófica por el calor del proceso de soldadura.

Procesos de soldadura como el de haz de electrones y de láser que generan altos niveles de calor por muy breves periodos y, por lo mismo, enfriamientos rápidos, minimizan la exposición del metal a temperaturas por encima de la recrystalización y, en consecuencia, reducen este tipo de perjuicio. Similarmente, un proceso conocido como soldadura por agitación con fricción casi no presenta una HAZ y se utiliza comercialmente para soldar aleaciones de aluminio. En el capítulo 8 analizaremos con más detalle los procesos de unión de metales.

7-9

Trabajo en caliente

Un metal se puede deformar para que obtenga una forma útil mediante el trabajo en caliente en lugar del trabajo en frío. Como se describió antes, el trabajo en caliente se define como deformación plástica del material metálico a una temperatura mayor que la de recrystalización. Durante el trabajo en caliente, el material se recrystaliza en forma continua (Fig. 7-21). Como se dijo antes, a la temperatura ambiente el plomo (Pb) está muy por arriba de su temperatura de recrystalización de -4°C y, en consecuencia, el Pb no se endurece por deformación y permanece suave y dúctil a temperatura ambiente.

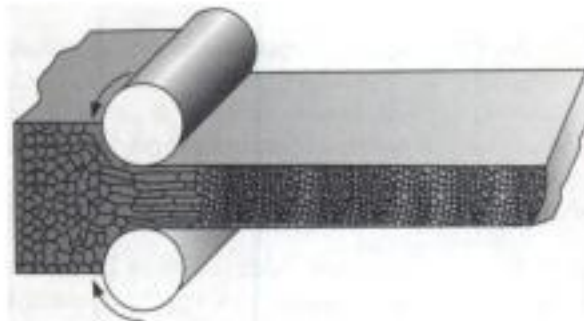


Figura 7-21 Durante el trabajo en caliente, los granos anisotrópicos alargados se recrystalizan de inmediato. Si se controla bien la temperatura de trabajo en caliente, el tamaño final del grano trabajado en caliente puede ser muy pequeño.

Ausencia de Endurecimiento No hay endurecimiento durante la deformación por trabajo en caliente; en consecuencia, la cantidad de deformación plástica es casi ilimitada. Se puede reducir una placa muy gruesa hasta llegar a una lámina delgada en una serie de operaciones continuas. Los primeros pasos del proceso se efectúan muy arriba de la temperatura de recrystalización, para aprovechar la menor resistencia del metal. El último paso se hace justo arriba de la temperatura de recrystalización, a una deformación porcentual grande, para producir el tamaño de grano más fino posible.

El trabajo en caliente es muy adecuado para moldear partes grandes, porque el metal tiene baja resistencia de cedencia y gran ductilidad a temperaturas elevadas. Además, los metales HCP como el magnesio tienen sistemas de deslizamiento más activos a las temperaturas del procesado en caliente; la mayor ductilidad admite mayores deformaciones que las que se pueden obtener con el trabajo en frío. El siguiente ejemplo ilustra el diseño de un proceso de trabajo en caliente.

EJEMPLO 7-7**Diseño de un proceso para producir cinta de cobre**

Se desea producir una cinta de cobre de 0.1 cm de espesor y 6 cm de ancho que tenga al menos 60 000 psi de resistencia de cedencia y al menos 5% de alargamiento. Sólo se puede comprar barra de cobre de 6 cm de ancho por 5 cm de espesor. Diseñe un proceso para fabricar la cinta deseada, pero con menos pasos que los que se necesitaron en el ejemplo 7-6.

SOLUCIÓN

En el ejemplo 7-6, se usó una serie de ciclos de trabajo en frío y recocido para llegar al espesor requerido. Se podrían reducir esos pasos laminando en caliente (TC) hasta el espesor intermedio requerido:

$$\% \text{ TC} = \left[\frac{t_o - t_f}{t_o} \right] \times 100 = \left[\frac{5 \text{ cm} - 0.182 \text{ cm}}{5 \text{ cm}} \right] \times 100 = 96.4\%$$

$$\% \text{ TC} = \left[\frac{t_o - t_f}{t_o} \right] \times 100 = \left[\frac{5 \text{ cm} - 0.167 \text{ cm}}{5 \text{ cm}} \right] \times 100 = 96.7\%$$

Obsérvese que las fórmulas para el trabajo en caliente y el trabajo en frío son iguales.

Como en el trabajo en caliente se efectúa la recristalización al mismo tiempo, se pueden obtener esas grandes deformaciones sin necesidad de un tratamiento aparte de recocido. Entonces, el diseño será:

1. Trabajar 96.4% en caliente la barra de 5 cm hasta el espesor intermedio de 0.182 cm.
2. Trabajar 45% en frío de 0.182 cm hasta la dimensión final de 0.1 cm. Este diseño proporciona las dimensiones y las propiedades correctas.

Eliminación de imperfecciones Algunas imperfecciones en el material metálico original se pueden eliminar o minimizar sus efectos. Se pueden cerrar y soldar las porosidades de gas durante el trabajo en caliente; el hueco interno formado al cerrar la inclusión se elimina por difusión durante el proceso de conformación y enfriamiento. Se pueden reducir las diferencias de composición en el metal, porque el trabajo en caliente acerca la superficie y el centro de la placa, reduciendo así las distancias de difusión.

Comportamiento anisotrópico Las propiedades finales en las partes trabajadas en caliente *no* son isotrópicas. Los rodillos de laminación o los dados, que por lo general están a menor temperatura que el metal, enfrían la superficie con más rapidez que el centro de la parte. Entonces, la superficie tiene un tamaño de grano más fino que en el centro. Además, se produce una estructura fibrosa porque las inclusiones y las partículas de segunda fase se alargan en la dirección del trabajo.

Acabado superficial y exactitud dimensional El acabado superficial suele ser más pobre que el obtenido por trabajo en frío. Con frecuencia, el oxígeno reacciona con el metal de la superficie formando óxidos, que son forzados sobre la superficie durante la conformación. Los aceros y otros metales trabajados en caliente se suelen someter a un "decapado" en el que se usan ácidos para disolver la costra de óxido. En algunos metales, como el tungsteno (W) y el berilio (Be), se debe hacer el tratamiento en caliente bajo una atmósfera protectora para evitar su oxidación.

También es más difícil controlar la exactitud dimensional durante el trabajo en caliente. Se debe tener en cuenta una deformación unitaria elástica mayor, porque el módulo de elasticidad es bajo a las temperaturas del trabajo en caliente. Además, el metal se contrae al enfriarse desde la temperatura del trabajo en caliente. La combinación de deformación elástica y de contracción térmica requiere que la parte tenga mayores dimensiones durante la deformación;

los dados de formado deben diseñarse con cuidado, y es necesario tener un control preciso de la temperatura, si se han de obtener dimensiones exactas.

7-10 Formado superplástico

Algunos materiales, cuando se les da un tratamiento especial en caliente y se procesan, se pueden deformar uniformemente una cantidad excepcional; en algunos casos, más de 1000%. [11,12] Este comportamiento, que se mencionó en el capítulo 6, se llama **superplasticidad**. Muchas veces se puede acoplar el formado superplástico con unión por difusión para producir ensamblajes complicados en un solo paso. Se requieren condiciones especiales para que un material muestre el comportamiento superplástico:

1. El material metálico debe tener una estructura de grano muy fina con tamaños de grano menores a aproximadamente 0.005 mm.
2. La aleación se debe deformar a una temperatura alta, con frecuencia cercana a 0.5 o 0.65 veces el punto absoluto de fusión de la aleación.
3. Se debe emplear una velocidad muy lenta de conformación, o **velocidad de deformación**. Además, el esfuerzo necesario para deformar la aleación debe ser muy sensible a la velocidad de deformación; es decir, debe tener una alta sensibilidad m a la velocidad de deformación. Si comienza a formarse cuello en un material con alta m , la región del cuello se deforma a mayor velocidad. La mayor velocidad de deformación, a su vez, endurece la región del cuello y detiene la formación del mismo, permitiendo que continúe la deformación uniforme. La tabla 7-5 incluye valores de m para algunos materiales superplásticos.
4. Los límites de grano en la aleación deben permitir que los granos se deslicen con facilidad entre sí y giren cuando se aplica el esfuerzo. Es necesario que haya una temperatura adecuada y un tamaño de grano fino para que se presente el **deslizamiento de límites de grano**. La formación superplástica se hace con más frecuencia en metales o aleaciones como Ti-6% Al-4% V, Cu-10% Al y Al-4.5% Zn-4.5% Ca (tabla 7.5). Los componentes aeroespaciales complejos se producen con frecuencia con la aleación superplástica de titanio. También se presenta la superplasticidad en las cerámicas que normalmente se consideran frágiles. Varios materiales cerámicos (Al_2O_3 y ZrO_2) y compuestos intermetálicos (por ejemplo Ni_3Si) muestran comportamiento superplástico. [6,13] Normalmente, el tamaño de grano de las cerámicas es ultrafino (<300 nm). Uno de los factores clave para que se observe comportamiento superplástico es asegurar que los granos se conserven finos y que no haya crecimiento de grano cuando el cerámico se exponga a temperaturas altas. Algunos de los nanocerámicos que se han sintetizado recientemente muestran comportamiento superplástico.

TABLA 7-5 ■ Características superplásticas de varios materiales [13, 14]

Aleación	Temperatura superplástica	% de alargamiento a la velocidad de deformación mencionada	Velocidad de deformación unitaria (s^{-1})	Sesibilidad a la velocidad de deformación unitaria m	Esfuerzo de fluencia (MPa)
Ti-6% Al-4% V	927	1000-200	2×10^{-4}	0.8	10
Al-4.5% Cu-0.5% Zn (Supral 100)	450	600-1000	10^{-3}	0.38	9
Al-4.5% Zn-4.5% Ca	565	500	10^{-3}	0.3	2.8
Fe-26% Cr-6.5% Ni	900	1000	5×10^{-5}	—	28
3mol% itria-zirconia 97%	1450	>160	$\sim 10^{-4}$	0.53	—
$Al_2O_3 + 0.05\% MgO + 0.05\%$ itria	1550	65	$\sim 10^{-4}$	—	—
80% en peso de (3 mol% itria, 97% zirconia) + 20% en peso de Al_2O_3	1650	~500	$\sim 10^{-3}$	0.5	—

RESUMEN

- Se pueden controlar las propiedades de los materiales cerámicos combinando la deformación plástica con los tratamientos térmicos.
- Cuando un material metálico se deforma por trabajo en frío, ocurre endurecimiento por deformación conforme se introducen dislocaciones adicionales en la estructura. De este modo, se pueden obtener aumentos muy grandes de resistencia. La ductilidad del material metálico endurecido por deformación se reduce.
- El endurecimiento por deformación, además de aumentar la resistencia y la dureza, aumenta los esfuerzos residuales, produce comportamiento anisotrópico y reduce la ductilidad, la conductividad eléctrica y la resistencia a la corrosión.
- La cantidad de endurecimiento por deformación está limitada por la disminución simultánea de la ductilidad; los materiales FCC suelen tener la mejor respuesta al fortalecimiento por trabajo en frío.
- El estirado de alambres, estampado, laminado y extrusión son algunos ejemplos de métodos de manufactura para dar forma a materiales metálicos. Algunos de los principios básicos de esos procesos también pueden aplicarse a la manufactura de materiales poliméricos.
- La restitución y el efecto Bauschinger son muy importantes en los procesos de manufactura para la conformación de aceros y otros materiales metálicos. Los diagramas de límite de formación son útiles para definir los procesos de conformación para materiales metálicos.
- El mecanismo de endurecimiento por deformación no es eficaz a temperaturas elevadas, donde se eliminan los efectos del trabajo en frío debido a la recrystalización.
- El recocido de los materiales metálicos es un tratamiento térmico cuyo objetivo es eliminar todos los efectos del endurecimiento por deformación, o al menos una parte de ellos. El proceso de recocido puede estar formado hasta por tres pasos.
- La recuperación se lleva a cabo a bajas temperaturas, eliminando los esfuerzos residuales y devolviendo la conductividad eléctrica sin reducir la resistencia. El "recocido para relevo de esfuerzos" es sinónimo de recuperación.
- La recrystalización se presenta a mayores temperaturas y elimina casi todos los efectos del endurecimiento por deformación. La densidad de dislocaciones baja en forma drástica durante la recrystalización, cuando nuclean y crecen nuevos granos.
- El crecimiento de grano, que normalmente se debe evitar, se presenta a temperaturas todavía mayores. En los materiales metálicos trabajados en frío, el crecimiento de grano sigue a la recuperación y la recrystalización. En los materiales cerámicos, el crecimiento de grano se puede presentar a causa de altas temperaturas, tiempos largos o de la presencia de una fase líquida durante la sinterización.
- En el trabajo en caliente se combinan la deformación plástica y el recocido en un solo paso, permitiendo grandes deformaciones plásticas sin fragilizar al material.
- Es necesario controlar los esfuerzos residuales en los materiales. En los materiales metálicos trabajados en frío, se pueden eliminar los esfuerzos residuales con un recocido de relevo de esfuerzos.
- El recocido de los vidrios causa la eliminación de los esfuerzos desarrollados durante el enfriamiento. El templado térmico de los vidrios es un tratamiento térmico en el cual un enfriamiento rápido deliberado de la superficie del vidrio causa un esfuerzo de compresión en la superficie. Se debe usar vidrio templado y laminado en aplicaciones donde la seguridad es importante.

- Se pueden introducir esfuerzos residuales de compresión en materiales metálicos usando granallado. Este tratamiento causa un aumento en la vida de fatiga.
- Normalmente, la deformación superplástica proporciona grandes cantidades de deformación en algunos materiales metálicos y cerámicos. Para el conformado superplástico, se requieren un cuidadoso control de la temperatura, una medida ultrafina de grano y una determinada velocidad de deformación.

GLOSARIO

Análisis de figura de polo Técnica especializada que se basa en la difracción de rayos X, para determinar la orientación preferente en películas delgadas, láminas o monocristales.

Efecto de Bauschinger Un material que previamente se haya deformado plásticamente a la tensión puede mostrar un menor esfuerzo de fluencia a la compresión o viceversa.

Endurecimiento por deformación Endurecimiento de un material mediante el aumento de la cantidad de dislocaciones por deformación, o trabajo en frío. También se le llama "endurecimiento por trabajo".

Endurecimiento por textura Aumento en la resistencia de un material a la cedencia, debido a una textura cristalográfica preferencial.

Endurecimiento por trabajo Término que se usa a veces en lugar de endurecimiento por deformación o trabajo en frío para describir el efecto de la deformación sobre el fortalecimiento de los materiales metálicos.

Esfuerzos residuales Esfuerzos que se introducen en un material al procesarlo. Se pueden originar como resultado del trabajo en frío o por dilatación y contracción térmicas diferenciales. Un recocido de relevo de esfuerzos en los materiales metálicos y un recocido en los vidrios minimiza los esfuerzos residuales. Los esfuerzos residuales de compresión que se introducen en forma deliberada en la superficie al templar los vidrios o al granallar los materiales metálicos mejoran sus propiedades mecánicas.

Estirado Técnica de procesamiento por deformación en la que se tira de un material a través de una abertura en una matriz (por ejemplo, trefilado).

Estructura subgranular poligonizada Estructura subgranular que se produce en las primeras etapas del recocido. Los límites de los subgranos son una red de dislocaciones reacomodadas durante el calentamiento.

Exponente de endurecimiento por deformación (n) Parámetro que describe la susceptibilidad de un material al trabajo en frío. Describe el efecto de la deformación unitaria sobre la resistencia resultante del material. Un material con alto coeficiente de endurecimiento por deformación obtiene alta resistencia sólo con pequeñas cantidades de deformación o deformación unitaria.

Extrusión Técnica de procesamiento por deformación en la que se empuja un material a través de una abertura en un dado; se usa con materiales metálicos y poliméricos.

Formabilidad Capacidad de un material para estirarse y doblarse sin romperse. Los diagramas de formación describen la capacidad de estirar y doblar los materiales.

Formado superplástico Procesos de manufactura que emplean la superplasticidad en los materiales cerámicos o metálicos.

Fuente de Frank-Read Dislocación fija que, bajo un esfuerzo aplicado, produce más dislocaciones. Este mecanismo es responsable, al menos en parte, del endurecimiento por deformación.

Granallado con municiones Introducción de esfuerzos residuales de compresión en la superficie de una parte, mediante un bombardeo con granalla de acero. Los esfuerzos residuales pueden mejorar el funcionamiento general del material.

Microscopía de orientación Técnica especializada, que con frecuencia se basa en microscopía electrónica de barrido, para determinar la orientación cristalográfica de distintos granos en una muestra policristalina.

Polímeros termoplásticos Clase de polímeros formados por moléculas largas que, como el espagueti, están enredadas (por ejemplo, polietileno, nylon, PET, etcétera).

Procesamiento por deformación Técnicas para manufactura con materiales metálicos u otros, usando procesos como laminado, extrusión, trefilado, etcétera.

Procesamiento termomecánico Procesos que intervienen en la manufactura de componentes metálicos con deformación mecánica y diversos tratamientos térmicos.

Recocido En el contexto de un material metálico, el recocido es un tratamiento térmico para eliminar parte o todos los efectos del trabajo en frío. Para los vidrios, el recocido es un tratamiento térmico que hace desaparecer esfuerzos inducidos térmicamente.

Recocido de relevo de esfuerzos Etapa de recuperación del tratamiento térmico de recocido, durante la cual los esfuerzos residuales desaparecen sin reducir las propiedades mecánicas del material.

Recristalización Tratamiento térmico de recocido a temperatura intermedia diseñado para eliminar todos los efectos del endurecimiento por deformación.

Recuperación Tratamiento térmico de recocido a baja temperatura diseñado para eliminar esfuerzos residuales inducidos durante la deformación, sin reducir la resistencia del material trabajado en frío. Es igual que el relevo de esfuerzos en un material.

Sensibilidad a la velocidad de deformación (m) Rapidez con que el esfuerzo produce cambios en función de la velocidad de deformación unitaria. Un material puede comportarse en forma muy diferente si se prensa con lentitud para darle una forma en lugar de golpearlo con rapidez por un golpe de impacto.

Superplasticidad Capacidad de un material metálico o cerámico para deformarse uniformemente una cantidad excepcionalmente grande. Se requiere un control cuidadoso de la temperatura, un tamaño ultrafino de grano y una determinada velocidad de deformación para que un material se comporte en forma superplástica.

Temperatura de recristalización Temperatura arriba de la cual se forman nuevos granos esencialmente sin dislocaciones, a partir de un material que fue trabajado en frío. Depende del grado de trabajo en frío, del tiempo de tratamiento térmico, etc., y no es una temperatura fija.

Templado En el contexto de procesamiento del vidrio, templado indica un tratamiento térmico que produce un esfuerzo de compresión en la superficie del vidrio. Esta capa de esfuerzo de compresión hace que el vidrio templado sea más seguro. En el contexto del procesamiento de materiales metálicos, el templado es un tratamiento térmico para aumentar la dureza del material.

Textura fibrilar o fibrosa Orientación preferente de granos que se obtiene durante el proceso de estirado de alambres. Algunas direcciones cristalográficas en cada grano alargado se alinean con la dirección de estirado y causan el comportamiento anisotrópico.

Textura laminar Orientación preferida de granos que se obtiene durante el proceso de laminado. Ciertas direcciones cristalográficas se alinean con la dirección del laminado, y ciertos planos cristalográficos preferentes se vuelven paralelos a la superficie de la hoja.

Trabajo en caliente Deformación de un metal efectuada arriba de la temperatura de recristalización. Durante el trabajo en caliente, sólo cambia la forma del metal; la resistencia permanece relativamente inalterada, porque no hay endurecimiento por deformación.

Trabajo en frío Deformación de un metal a una temperatura menor que la de recristalización. Durante el trabajo en frío, aumenta la cantidad de dislocaciones haciendo que el metal se endurezca conforme cambia su forma.

Trabajo en tibio Término que indica el procesamiento de materiales metálicos en un intervalo de temperaturas intermedio entre las que definen el trabajo en caliente y el trabajo en frío (por lo general, una temperatura entre 0.3 y 0.6 de la temperatura de fusión en K).

Velocidad de deformación Rapidez con que se deforma un material.

Vidrio laminado de seguridad Dos piezas de vidrio recocido unidas por un plástico como polivinil butiral (PVB). Esta clase de vidrio puede usarse en los parabrisas.

Vidrio recocido Vidrio que se ha tratado calentándolo arriba de la temperatura de recocido (cuando la viscosidad del vidrio llega a ser 10^{13} poise) y luego enfriándolo con lentitud para reducir al mínimo o eliminar los esfuerzos residuales.

Vidrio templado Vidrio que se usa principalmente en aplicaciones donde la seguridad tiene especial importancia; se obtiene por tratamiento térmico y templado o por intercambio químico de iones. El templado da como resultado un esfuerzo neto de compresión en la superficie del vidrio.

Zona afectada por el calor El volumen del material adyacente a una soldadura que se calentó durante el proceso de soldadura a una temperatura crítica en la cual se presenta un cambio en la estructura, como crecimiento de grano o recristalización.

INFORMACIÓN ADICIONAL

1. MEYERS, M.A. y K.K. CHAWLA. *Mechanical Behavior of Materials*, Prentice Hall, 1988.
2. HOSFORD, W.F. y J.L. DUNCAN. "The Aluminum Beverage Can", *Scientific American*, septiembre de 1994, pp. 48-53.
3. DAVIS, J.R. *Metals Handbook—Desk Edition*, ASM International, 1998.
4. DEARDO, A.J., I. GARCÍA y M. HUA. *Se agradecen las discusiones y la asistencia técnica*, 2002.
5. CHEN, Z., S. MAEKAWA y T. TAKEDA. "Bauschinger Effect and Multiaxial Yield Behavior of Stress-Reversed Mild Steel", *Metallurgical and Materials Transactions*, 30A, diciembre de 1999, pp. 3069-3078.
6. CHEN, I.W. "Superplasticity in Ceramic Systems", en *Encyclopedia of Advanced Materials*, D.B. BLORR, R.J., FLEMINGS, M.C. y MAHAJAN, S., Eds., 1994, pp. 2715-2717.
7. VERHOEVEN, J.D. *Fundamentals of Physical Metallurgy*, Wiley, 1975.
8. DEGARMO, E.P., J.T. BLACK y R.A. KOSHE. *Materials and Processes in Manufacturing*, 8a. ed., Prentice Hall, 1997.
9. DAVID, S.A. y T. DEBROY. "Current Issues and Problems in Welding Science", *Science*, 257, 1992, pp. 497-502.
10. DEBROY, T. y S.A. DAVID. "Physical Processes in Fusion Welding", *Reviews of Modern Physics*, 67(1), 1995, pp. 85-112.
11. BARNES, A.J. "Superplastic Forming: Trends and Prospects", *Aluminum World*, 1(1), 2001, pp. 130-132.
12. SHERBY, O.D., T.G. NIEH y J. WADSWORTH. "Some Thoughts on Future Directions for Research and Applications in Superplasticity", en *Material Science Forum: Superplasticity in Advanced Materials*, ICSAM-97, 1997, pp. 11-20 y 243-245.
13. BENGISU, M. *Engineering Ceramics*, Springer Verlag, 2001.
14. HAMILTON, C.H. "Superplastic Forming of Metals", en *Encyclopedia of Advanced Materials*, D.B. BLORR, R.J. FLEMINGS, M.C. y MAHAJAN, S., Eds., 1994, pp. 2712-2714.

✓ PROBLEMAS

Sección 7-1 Relación entre el trabajo en frío y la curva esfuerzo-deformación unitaria

- 7-1 Con un diagrama esfuerzo-deformación unitaria explique qué significa el término "endurecimiento por deformación".
- 7-2 ¿Qué significa "restitución"? ¿Cuál es la importancia de este término desde un punto de vista de manufactura?
- 7-3 ¿Qué significa el término "efecto Bauschinger"?
- 7-4 ¿Cuáles técnicas de manufactura usan el proceso de trabajo en frío?
- 7-5 Una barra metálica de 0.505 pulg de diámetro con longitud calibrada (l_0) de 2 pulg se somete a un ensayo de tensión. Se realizan las siguientes mediciones en la región plástica:

Fuerza (lb)	Cambio en longitud calibrada (pulg)(Δl)	Diámetro (pulg)
27 500	0.2103	0.4800
27 000	0.4428	0.4566
25 700	0.6997	0.4343

Determine el exponente de endurecimiento por deformación para este metal. Ese metal ¿posiblemente sea FCC, BCC o HCP? Explique por qué.

- 7-6 Defina los siguientes términos: exponente de endurecimiento por deformación (n), sensibilidad a la velocidad de deformación (m) y relación de deformación plástica (r). Use las ecuaciones correspondientes.
- 7-7 Una barra de metal de 1.5 cm de diámetro con 3 cm de longitud calibrada (l_0) se somete a un ensayo de tensión. Se realizan las siguientes mediciones:

Fuerza (lb)	Cambio en longitud calibrada (pulg)(Δl)	Diámetro (cm)
16 240	0.6642	1.2028
19 066	1.4754	1.0884
19 273	2.4663	0.9848

Determine el coeficiente de endurecimiento por deformación para este metal. ¿Qué es lo más probable: que este metal sea FCC, BCC o HCP? Explique por qué.

- 7-8 ¿Qué significa el término "formabilidad de un material"?
- 7-9 En la figura 7-22 se muestra una curva de esfuerzo real-deformación unitaria real. Determine el exponente de endurecimiento por deformación para ese metal.
- 7-10 Una barra de tensión de aleación de Zn con 30% de Cu tiene un coeficiente de endurecimiento por deformación de 0.50. La barra, cuyo diámetro inicial es 1 cm y su longitud calibrada inicial de 3 cm, falla a un esfuerzo

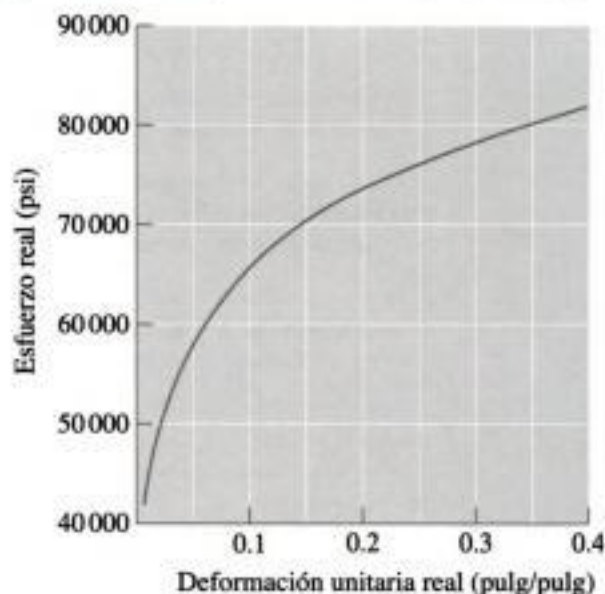


Figura 7-22 Curva de esfuerzo real-deformación unitaria real (para el problema 7-9).

ingenieril o unitario de 120 MPa. Después de fracturarse, la longitud calibrada es 3.5 cm y el diámetro es 0.926 cm. No se forma cuello. Calcule el esfuerzo real cuando la deformación unitaria real es de 0.05 cm/cm.

Sección 7-2 Mecanismos de endurecimiento por deformación

- 7-11 Explique por qué muchos materiales metálicos muestran endurecimiento por deformación.
- 7-12 ¿El mecanismo de endurecimiento por deformación depende del tamaño de grano? ¿Depende de la densidad de dislocaciones?
- 7-13 Compare y describa las diferencias entre endurecimiento por deformación y fortalecimiento por tamaño de grano. ¿Qué causa la resistencia al movimiento de las dislocaciones en cada uno de estos mecanismos?
- 7-14 La fuente de Frank-Read que se muestra en la figura 7-5(e) ha creado cuatro circuitos de dislocación a partir de la línea original de dislocación. Estime la línea total de dislocación presente en la fotografía y determine el porcentaje de aumento de longitud de las dislocaciones producidas por la deformación.
- 7-15 Normalmente, el endurecimiento por deformación no se considera en los materiales cerámicos. Explique por qué.
- 7-16 Los polímeros termoplásticos, como el polietileno, muestran un aumento de resistencia cuando se someten a un esfuerzo. Explique cómo se produce este endurecimiento.

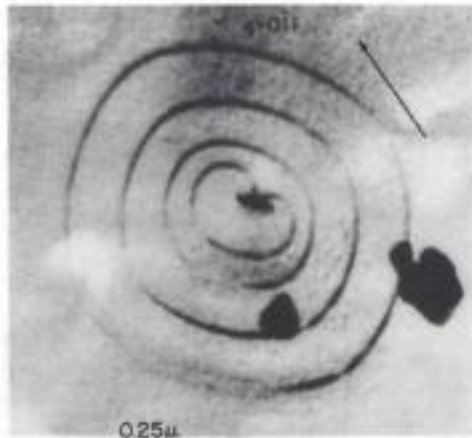


Figura 7-5 (Repetida para el problema 7-14)
(e) Micrografía electrónica de una fuente de Frank-Read (300 000 $\times$). (Adaptado de Brittain, J. "Climb Sources in Beta Prime-NiAl", Metallurgical Transactions, vol. 6A, abril de 1975.)

- 7-17 Las botellas para bebidas carbonatadas se fabrican con plástico PET. Explique cómo la cristalización inducida por esfuerzo aumenta la resistencia de las botellas de PET fabricadas con el proceso de soplado y estirado (véanse los capítulos 4 y 5).

Sección 7-3 Propiedades en función del porcentaje de trabajo en frío

- 7-18 Escriba la ecuación que define al porcentaje de trabajo en frío. Explique el significado de cada término.
- 7-19 Una placa de cobre de 0.25 pulg de espesor se va a trabajar 63% en frío. Calcule el espesor final.
- 7-20 Una varilla de cobre de 0.25 pulg de diámetro se debe trabajar 63% en frío. Calcule el diámetro final.
- 7-21 Una barra de cobre de 2 pulg de diámetro se reduce a 1.5 pulg de diámetro, y después se vuelve a reducir hasta un diámetro final de 1 pulg. En otro caso, la barra de 2 pulg de diámetro se reduce en un paso, de 2 pulg a 1 pulg de diámetro. Calcule el % de TF para ambos casos.
- 7-22 Una placa de aluminio 3105 se reduce de 1.75 a 1.15 pulg. Determine las propiedades finales de la placa. El 3105 indica una composición especial de la aleación de aluminio. (Véase la Fig. 7-23.)
- 7-23 Una barra de Zn con 30% de Cu se reduce de un diámetro de 1 pulg hasta un diámetro de 0.45 pulg. Determine las propiedades finales de la barra. (Véase la Fig. 7-24.)
- 7-24 Una barra de aluminio 3105 se reduce de un diámetro de 1 pulg a uno de 0.8 pulg, después a 0.6 pulg y finalmente hasta un diámetro de 0.4 pulg. Calcule el % TF y las propiedades después de cada paso del proceso. Calcule el trabajo porcentual total en frío. El 3105 indica una composición especial de aleación de aluminio. (Véase la Fig. 7-23.)

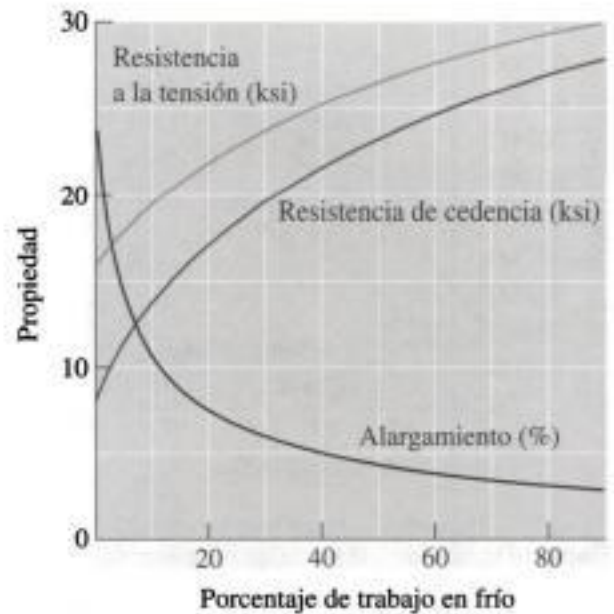


Figura 7-23 Efecto del trabajo porcentual en frío sobre las propiedades de una aleación de aluminio 3105 (para los problemas 7-22 y 7-24).

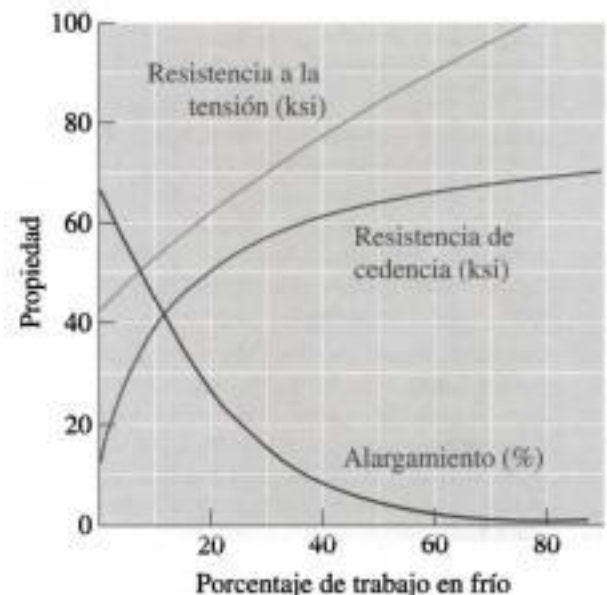


Figura 7-24 Efecto del trabajo porcentual en frío sobre las propiedades de un latón de Cu-30% Zn (para los problemas 7-23 y 7-26).

- 7-25 Se desea que una barra de cobre tenga una resistencia a la tensión mínima de 70 000 psi y un diámetro final de 0.375 pulg. ¿Cuál es el diámetro mínimo de la barra original? (Véase la Fig. 7-7.)
- 7-26 Deseamos que una placa de latón de Zn con 30% de Cu, que originalmente tiene 1.2 pulg de espesor, tenga una resistencia de cedencia mayor que 50 000 psi y un % de

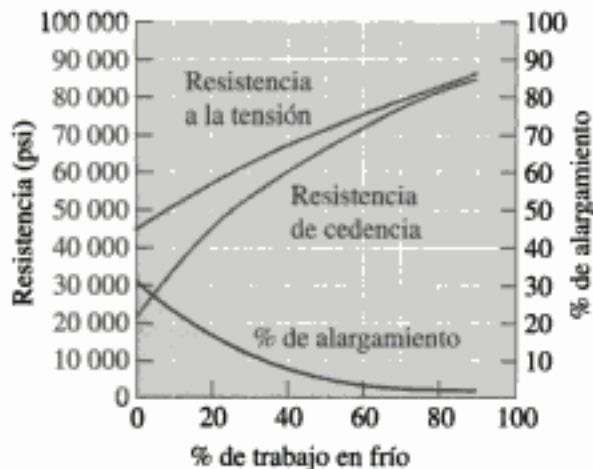


Figura 7-7 (Repetida para los problemas 7-25 y 7-27). Efecto del trabajo en frío sobre las propiedades mecánicas del cobre.

alargamiento al menos de 10%. ¿Qué intervalo de espesores finales se debe obtener? (Véase la Fig. 7-24.)

- 7-27 Se desea que una lámina de cobre tenga al menos 50000 psi de resistencia de cedencia y al menos 10% de alargamiento, con un espesor final de 0.12 pulg. ¿Qué intervalo de grosores originales se debe usar? (Véase la Fig. 7-7.)
- 7-28 Una placa de aluminio 3105 fue previamente trabajada 20% en frío, y su espesor es de 2 pulg. A continuación se sigue trabajando más en frío hasta llegar a 1.3 pulg. Calcule el trabajo en frío porcentual total y determine las propiedades finales de la placa. El 3105 representa una composición especial de la aleación de aluminio. (Véase la Fig. 7-23.)
- 7-29 Una banda de aluminio-litio (Al-Li) de 0.25 pulg de espesor y 2 pulg de ancho se va a cortar de una placa laminada, como se muestra en la figura 7-10. La banda debe sostener una carga de 35 000 lb sin deformarse plásticamente. Determine el intervalo de orientaciones dentro del cual se puede recortar la banda de la placa laminada.

Sección 7-4 Microestructura, endurecimiento por textura y esfuerzos residuales

- 7-30 ¿La resistencia de cedencia de los materiales metálicos depende de la textura cristalográfica que desarrollan los materiales durante el trabajo en frío? Explique por qué.
- 7-31 ¿El módulo de Young de un material depende de las direcciones cristalográficas en un material cristalino? Explique por qué.
- 7-32 ¿Qué significan los términos "textura de fibra" y "textura laminar"?
- 7-33 Una de las desventajas del proceso de laminación en frío es la generación de esfuerzos residuales. Explique

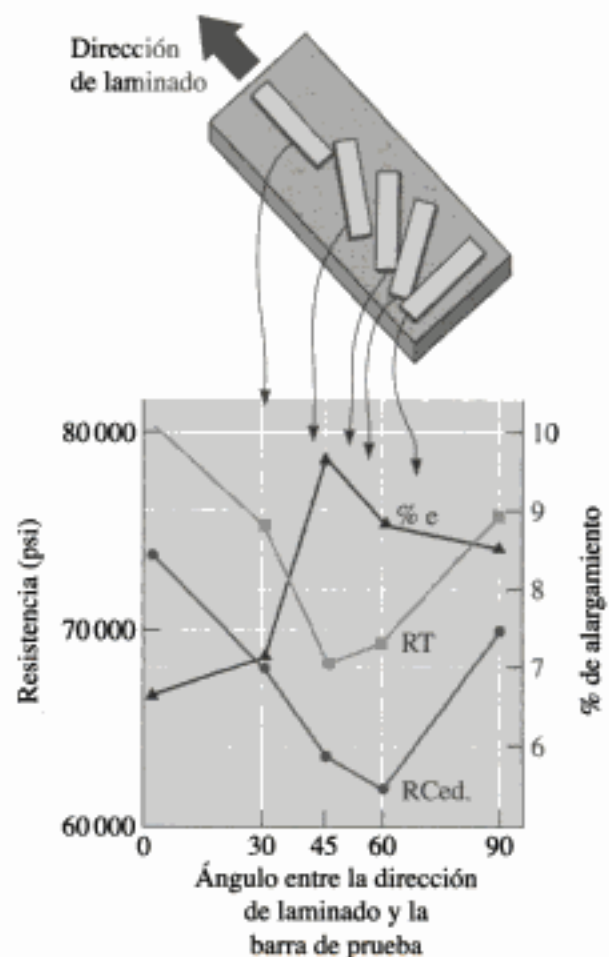


Figura 7-10 (Repetida para el problema 7-29). Comportamiento anisotrópico en un material laminado de aluminio-litio usado en aplicaciones aeroespaciales. En el esquema se relaciona la posición de las barras de tensión con las propiedades mecánicas que se obtienen.

cómo se pueden eliminar los esfuerzos residuales en los materiales metálicos trabajados en frío.

- 7-34 ¿Qué es el granallado?
- 7-35 ¿Cuál es la diferencia entre templar y recocer vidrios?
- 7-36 ¿En qué difiere el vidrio de seguridad laminado del vidrio templado? ¿Dónde se usa el vidrio laminado?
- 7-37 ¿Qué es templado térmico? ¿En qué difiere del templado químico? Describa aplicaciones de los vidrios templados.
- 7-38 Explique los factores que afectan más la resistencia del vidrio. Explique cómo el templado térmico contribuye a aumentar la resistencia del vidrio.
- 7-39 Los esfuerzos residuales no siempre son indeseables. ¿Esto es cierto o falso? Justifique su respuesta.

Sección 7-5 Características del trabajo en frío

- 7-40 El trabajo en frío no se puede usar como mecanismo para fortalecer materiales que se van a someter a altas temperaturas durante su uso. Explique por qué.
- 7-41 Las latas de aluminio fabricadas por embutido profundo adquieren una gran resistencia durante su fabricación. Explique por qué.
- 7-42 Los metales como el magnesio no se pueden fortalecer bien con el trabajo en frío. Explique por qué.
- 7-43 Se desea estirar un alambre de cobre de 0.3 pulg de diámetro y resistencia de cedencia de 20 000 psi, para formar un alambre de 0.25 pulg de diámetro.
- Calcule la fuerza de estirado, suponiendo que no hay fricción.
 - ¿El alambre estirado se romperá durante el proceso de estiramiento? Demuestre por qué. (Véase la Fig. 7-7.)

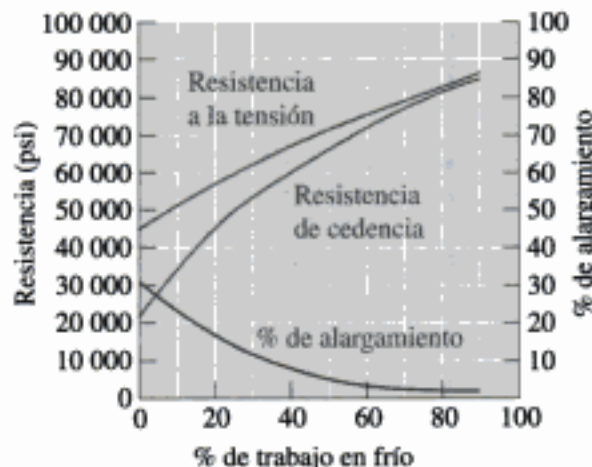


Figura 7-7 (Repetida para el problema 7-43). Efecto del trabajo mecánico sobre las propiedades mecánicas del cobre.

- 7-44 Un alambre de aluminio 3105 se debe estirar para obtener un alambre de 1 mm de diámetro, que tenga una resistencia de cedencia de 20 000 psi. El 3105 representa una composición especial de aleación de aluminio.
- Calcule el diámetro original del alambre,
 - calcule la fuerza de estiramiento requerida y
 - determine si el alambre tal como se estiró se romperá durante el proceso. (Véase la Fig. 7-23.)

Sección 7-6 Las tres etapas del recocido

- 7-45 Explique las tres etapas del recocido de los materiales metálicos.
- 7-46 ¿Cuál es la fuerza motriz para la recristalización?

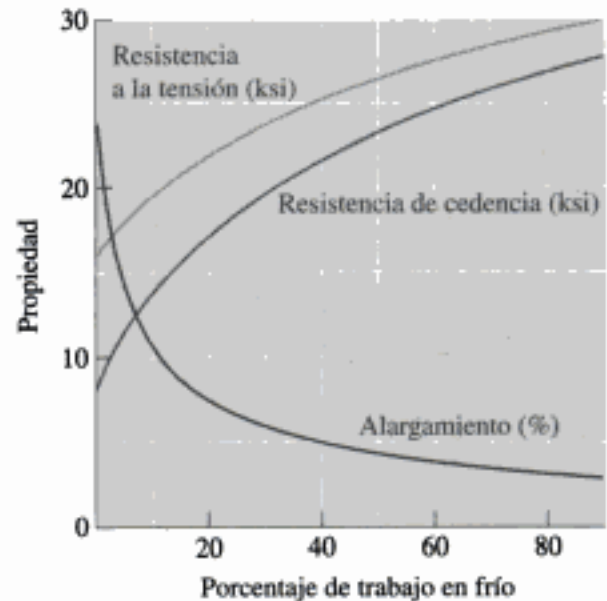


Figura 7-23 Efecto del porcentaje de trabajo en frío sobre las propiedades de una aleación de aluminio 3105. (Para los problemas 7-28 y 7-44.)

- 7-47 En la etapa de recuperación, los esfuerzos residuales se reducen; sin embargo, la resistencia del material permanece igual. Explique por qué.
- 7-48 ¿Cuál es la fuerza motriz para el crecimiento de grano?
- 7-49 El tratamiento de crecimiento de grano es la tercera etapa del recocido; explique su efecto sobre la resistencia de los materiales metálicos.
- 7-50 ¿Por qué el crecimiento del grano suele ser perjudicial? Describa un ejemplo en el que en realidad el crecimiento del grano sea benéfico.
- 7-51 ¿Cuáles son las diversas formas en que puede haber crecimiento de grano en los materiales cerámicos?
- 7-52 ¿El recocido y la recuperación son siempre necesarios para el crecimiento del grano? Explique por qué.
- 7-53 Una aleación de titanio contiene una dispersión muy fina de partículas diminutas de Er_2O_3 (óxido de erbio). ¿Cuál será el efecto de esas partículas sobre la temperatura de crecimiento de grano y el tamaño de los granos a determinada temperatura de recocido? Explique su respuesta.
- 7-54 Explique por qué termina por fallar el filamento de tungsteno de los bulbos incandescentes.
- 7-55 Los siguientes datos se obtuvieron cuando se recoció un metal trabajado en frío.
- Estime las temperaturas de recuperación, recristalización y crecimiento de grano.

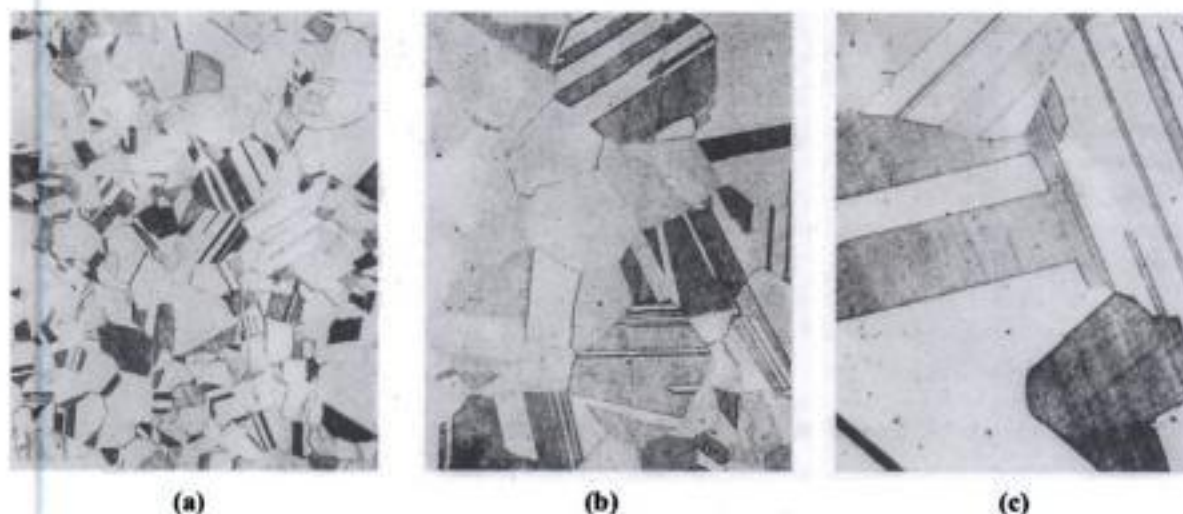


Figura 7-16 (Repetida para el problema 7-58). Fotomicrografías que muestran el efecto de la temperatura de recocido sobre el tamaño del grano en el latón. También se pueden observar límites de macia en las estructuras. (a) Recocido a 400 °C, (b) recocido a 650 °C y (c) recocido a 800 °C (75×). (Adaptado de Brick, R. y Phillips, A., *The Structure and Properties of Alloys*, McGraw-Hill, 1949.)

- b) Recomiende una temperatura adecuada para un tratamiento térmico de relevo de esfuerzos.
 c) Recomiende una temperatura adecuada para un proceso de trabajo en caliente, y
 d) Estime la temperatura de fusión de la aleación.

Temperatura de recocido (°C)	Conductividad eléctrica ($\text{ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Resistencia de cedencia (MPa)	Tamaño de grano (mm)
400	3.04×10^5	86	0.10
500	3.05×10^5	85	0.10
600	3.36×10^5	84	0.10
700	3.45×10^5	83	0.098
800	3.46×10^5	52	0.030
900	3.46×10^5	47	0.031
1000	3.47×10^5	44	0.070
1100	3.47×10^5	42	0.120

Temperatura de recocido (°C)	Esfuerzos residuales (psi)	Resistencia a la tensión (psi)	Tamaño de grano (pulg)
250	21 000	52 000	0.0030
275	21 000	52 000	0.0030
300	5 000	52 000	0.0030
325	0	52 000	0.0030
350	0	34 000	0.0010
375	0	30 000	0.0010
400	0	27 000	0.0035
425	0	25 000	0.0072

7-56 Los datos siguientes se obtuvieron cuando se recoció un metal trabajado en frío.

- a) Estime las temperaturas de recuperación, recristalización y crecimiento de grano.
 b) Recomiende una temperatura adecuada para obtener un alambre de alta resistencia y gran conductividad eléctrica.
 c) Recomiende una temperatura adecuada para un proceso de trabajo en caliente, y
 d) Estime la temperatura de fusión de la aleación.

- 7-57 ¿Qué significa el término “recristalización?” Explique por qué la resistencia de cedencia de un material metálico baja durante esta etapa del recocido.
 7-58 Determine el número ASTM de tamaño de grano para cada una de las micrografías de la figura 7-16 y grafique el número de tamaño de grano en función de la temperatura de recocido.

Sección 7-7 Control del recocido

- 7-59 ¿Cuál es la diferencia entre el trabajo en caliente y el trabajo en frío para los materiales metálicos?
 7-60 ¿Por qué la temperatura de recristalización no es fija para un material determinado?
 7-61 ¿Por qué al aumentar el tiempo de un tratamiento térmico la recristalización se presenta a menor temperatura?

- 7-62 Dos láminas de acero tienen trabajos en frío de 20% y 80%, respectivamente. ¿Cuál de ellas tendrá menor temperatura de recristalización? ¿Por qué?
- 7-63 ¿Qué significa el término "trabajo en tibio"?
- 7-64 Dé ejemplos de dos materiales metálicos cuya deformación a temperatura ambiente sea "trabajo en caliente".
- 7-65 Dé ejemplos de dos materiales metálicos para cuya deformación mecánica a 900°C sea "trabajo en frío".

Sección 7-8 Recocido y procesamiento de materiales

- 7-66 Con los datos de la tabla 7-4, haga una gráfica de la temperatura de recristalización en función de la temperatura de fusión de cada metal, usando temperaturas absolutas (en kelvin). Mida la pendiente y compárela con la relación esperada entre esas dos temperaturas. ¿Es buena nuestra aproximación?

TABLA 7-4 ■ Temperaturas comunes de recristalización de algunos materiales (Repetida para el problema 7.66)

Metal	Temperatura de fusión (°C)	Temperatura de recristalización (°C)
Sn	232	-4
Pb	327	-4
Zn	420	10
Al	660	150
Mg	650	200
Ag	962	200
Cu	1085	200
Fe	1538	450
Ni	1453	600
Mo	2610	900
W	3410	1200

(Fuente: Adaptada de Structure and Properties of Engineering Materials, por R. Brick, A. Pense y R. Gordon, 1977. Copyright © 1977 The McGraw-Hill Companies. Reproducida con autorización.)

- 7-67 Se desea producir una placa de 0.3 pulg de grueso, de aluminio 3105 que tiene una resistencia mínima a la tensión de 25 000 psi y un alargamiento mínimo de 5%. El espesor original de la placa es de 3 pulg. El trabajo máximo en frío en cada paso es de 80%. Describa los pasos de trabajo en frío y de recocido necesarios para obtener este producto. Compare este proceso con lo que usted recomendaría si pudiera hacer la primera deformación con trabajo en caliente. (Véase la Fig. 7-23.)

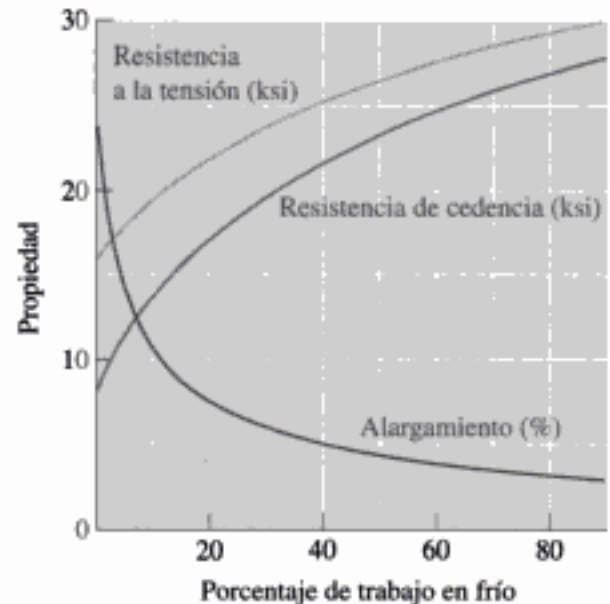


Figura 7-23 Efecto del porcentaje de trabajo en frío sobre las propiedades de una aleación de aluminio 3105. (Para el problema 7-67.)

- 7-68 Se desea producir un alambre de cobre de 0.2 pulg de diámetro, con una resistencia mínima de cedencia de 60 000 psi y un alargamiento mínimo de 5%. El diámetro original de la barra es de 2 pulg y el trabajo máximo en frío en cada paso es de 80%. Describa los pasos de trabajo en frío y recocido necesarios para fabricar este producto. Compare este proceso con lo que usted recomendaría si pudiera hacer la primera deformación con deformación en caliente. (Véase la Fig. 7-7.)

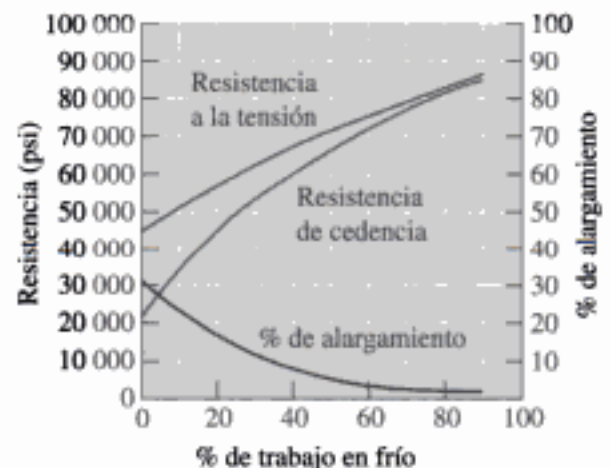


Figura 7-7 Efecto del trabajo en frío sobre las propiedades mecánicas del cobre. (Para el problema 7-68.)

- 7-69 ¿Qué es una zona afectada por el calor? ¿Por qué algunos procesos de soldadura causan una unión en la que el material de la zona afectada por el calor es más débil que el metal base?
- 7-70 ¿Qué técnicas de soldadura se pueden usar para evitar pérdida de resistencia en el material de la zona afectada por el calor? Explique por qué esas técnicas son eficaces.

Sección 7-9 Trabajo en caliente

- 7-71 La cantidad de deformación plástica que puede hacerse durante el tratamiento en caliente es casi ilimitada. Justifique esta afirmación.
- 7-72 Compare y describa las diferencias entre trabajo en caliente y trabajo en frío.

Sección 7-10 Formado superplástico

- 7-73 ¿Qué significa el término "superplasticidad"?
- 7-74 ¿Por qué mucha gente considera que los cerámicos son frágiles, no obstante que muchos de éstos presentan superplasticidad?
- 7-75 ¿Cuáles son los requisitos microestructurales para que los materiales metálicos o cerámicos muestren superplasticidad?



Problemas de diseño

- 7-76 Diseñe, usando uno de los procesos descritos en este capítulo, un método para producir cada uno de los siguientes productos. ¿Esos procesos deben incluir trabajo en caliente, trabajo en frío, recocido o alguna combinación de ellos? Explique sus decisiones.
- Broches (*clips*) para papel.
 - Vigas I que se deben soldar para construir parte de un puente.
 - Tubo de cobre para conectar una llave de agua potable con el tubo principal de cobre.
 - La cinta de acero de un flexómetro.
 - La cabeza de un martillo de carpintero, a partir de una barra redonda.

- 7-77 Se desea unir con soldadura blanda o estañado dos láminas de cobre trabajado en frío. La soldadura implica calentar el metal a una temperatura lo suficientemente alta como para que un material de relleno se funda y penetre en la unión (capítulo 8). Diseñe y explique un proceso de soldadura que no suavice al cobre. Explique. ¿Se podrían usar mayores temperaturas de soldadura si el material fuera una aleación de Zn con 30% de Cu? Explique por qué.
- 7-78 Se desea producir alambre de cobre de 1 mm de diámetro que tenga una resistencia mínima de cedencia de 60 000 psi y un alargamiento mínimo de 5%. Se parte de una varilla de 20 mm de diámetro. Diseñe el proceso para estirar el alambre. Anote todos los detalles importantes y explíquelos.



Problemas en computadora

- 7-79 *Relación de deformación plástica.* Escriba un programa de computadora que pida al usuario ingresar las dimensiones iniciales y finales (ancho y espesor) de una placa y proporcione el valor de la relación de deformación plástica.
- 7-80 *Diseño de un proceso de trefilado de alambre.* Escriba un programa que calcule la solución para resolver el ejemplo 7-5. El programa debe pedir al usuario un valor para el diámetro final del alambre (por ejemplo, 0.20 cm). Debe suponer un valor razonable para el diámetro inicial (d_0) (por ejemplo 0.40 cm) y calcular el grado de trabajo en frío usando la fórmula adecuada. Suponga que el usuario tiene acceso a la curva de resistencia de cedencia en función de % de trabajo en frío, y que se le pide que ingrese el valor de la resistencia de cedencia para 0% de trabajo en frío. Use este valor para calcular las fuerzas necesarias en el estirado y el esfuerzo que actúa sobre el alambre al salir del dado. El programa debe pedir al usuario ingresar el valor de la resistencia de cedencia del alambre para la cantidad de trabajo en frío calculada para el diámetro inicial supuesto y el diámetro final necesario. Como en el ejemplo 7-5, el programa debe repetir esos cálculos hasta obtener un valor de d_0 que sea aceptable.

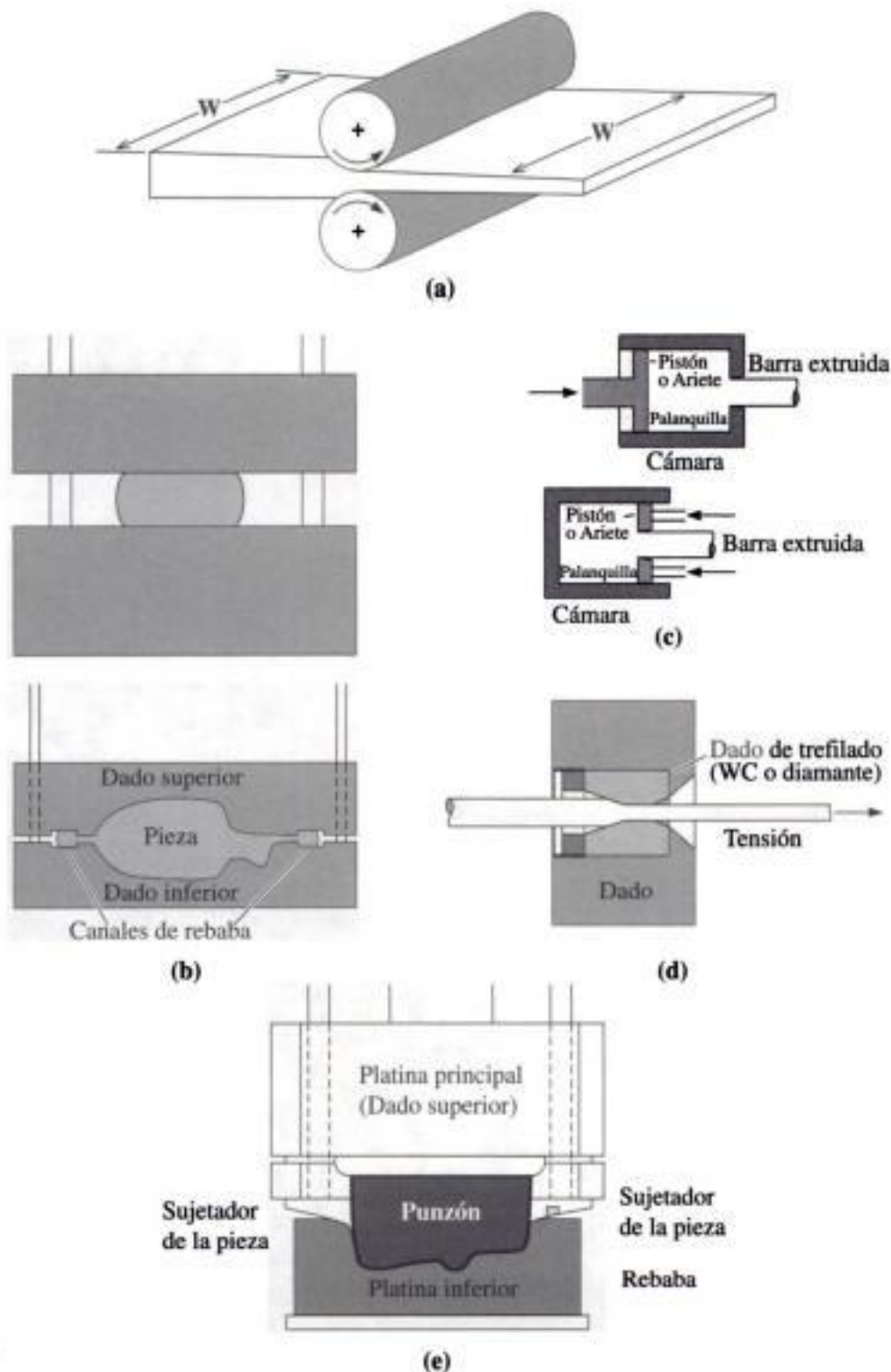
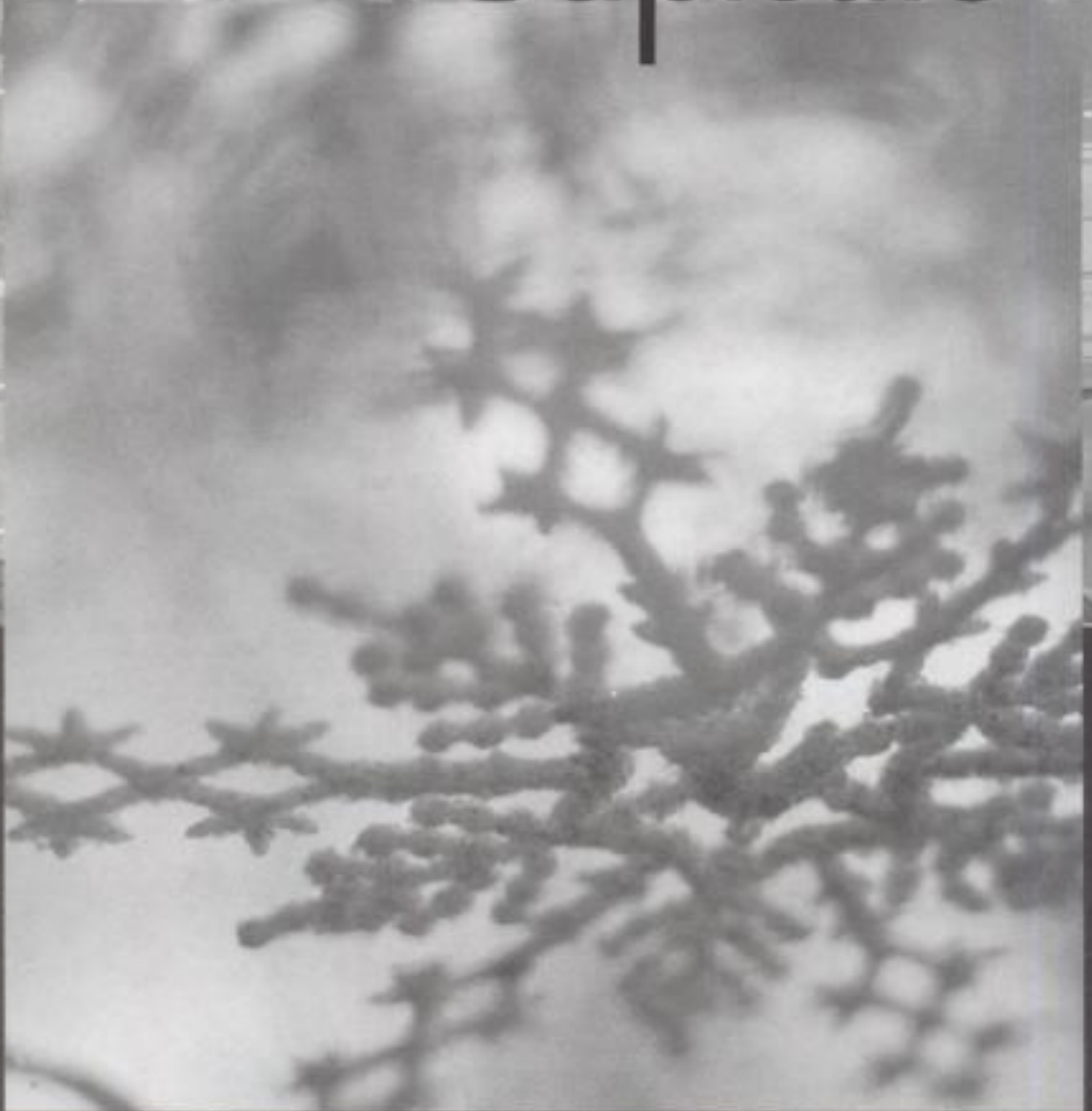


Figura 7-2 (Repetida para el problema 7-76). Procesos de manufactura que emplean el trabajo en frío y el trabajo en caliente. Métodos comunes para trabajar metales. (a) Laminado. (b) Forjado (matriz abierta y cerrada). (c) Extrusión (directa e indirecta). (d) Trefilado o estirado de alambre. (e) Estampado. (Fuente: Adaptado de Mechanical Behavior of Materials, por M.A. Meyers y K.K. Chawla, p. 292, fig. 6-1. Copyright © 1999 Prentice Hall. Adaptado con autorización de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.)

By Arkanosant...

Capítulo



En la formación de los copos de nieve, que aquí se ven, es importante el proceso de la nucleación y el crecimiento de una fase a partir de otra. En forma parecida, la nucleación y el crecimiento de cristales pequeños a partir de materiales fundidos también es muy importante en procesos de manufactura relacionados con la solidificación. Por otra parte, las tecnologías relacionadas con la producción de vidrio dependen de que no haya nucleación ni crecimiento de cristales. (Cortesía de Getty Images.)

Principios de solidificación

¿Alguna vez se preguntó...

- ...si el agua realmente se "congela" a 0°C y "hierva" a 100°C ?
- ...cómo funcionan las máquinas de hacer nieve?
- ...qué papel ha desempeñado el proceso de solidificación en la evolución de la humanidad?
- ...cuál es el proceso que se usa para producir varios millones de libras de aceros y demás aleaciones?
- ...si hay una temperatura específica de fusión de una aleación o un material termoplástico?
- ...qué factores determinan la resistencia de un producto vaciado?
- ...por qué la mayoría de los vidrios y los vitrocerámicos se procesan por fusión y vaciado?

De todas las técnicas de procesamiento que se usan en la manufactura de los materiales, es posible que la de solidificación sea la más importante.[1,2] Todos los materiales metálicos, así como muchos cerámicos, vidrios inorgánicos y polímeros termoplásticos, son líquidos o están fundidos en algún momento durante su procesamiento. Al igual que el agua se congela y

forma hielo, los materiales se solidifican al enfriarse por debajo de su temperatura de solidificación. En el capítulo 2 vimos cómo se clasifican los materiales con base en su orden atómico, iónico o molecular. Durante la solidificación de los materiales que cristalizan, el arreglo atómico de los materiales cristalizados cambia de un orden de corto alcance a uno de largo alcance.

La solidificación de los materiales cristalinos requiere dos pasos: en el primero, se forman en el líquido pequeños cristales ultrafinos, llamados núcleos de la fase sólida. En el segundo paso, que puede traslaparse con el primero, los pequeños cristales sólidos ultrafinos comienzan a crecer a medida que los átomos en el líquido se adhieren a los núcleos, hasta que ya no queda líquido. Algunos materiales, como por ejemplo los vidrios inorgánicos de silicato, se solidifican sin desarrollar un orden de largo alcance; es decir, permanecen amorfos. Muchos materiales poliméricos pueden desarrollar cristalinidad parcial durante su solidificación o su procesamiento.

El estudio del proceso de solidificación de los materiales metálicos, poliméricos y cerámicos es importante por su efecto sobre las propiedades de los materiales de que se trate. En el capítulo 7, examinamos cómo se puede usar el endurecimiento por deformación para fortalecer y conformar los materiales metálicos. En el

capítulo 4, aprendimos que el tamaño de grano desempeña un papel importante en la determinación de la resistencia de los materiales metálicos. En este capítulo, estudiaremos los principios de solidificación que se aplican a los metales puros. En capítulos posteriores describiremos la solidificación de las aleaciones y los materiales más complejos. Primero, describiremos la importancia tecnológica de la solidificación, para examinar después sus mecanismos. A esto seguirá un examen de la microestructura de los materiales metálicos vaciados y su efecto sobre las propiedades mecánicas de los mismos. También examinaremos el papel del vaciado como proceso de conformación de materiales. Examinaremos cómo se usan técnicas como la soldadura, latonado y estañado para unir a los metales. También describiremos las aplicaciones del proceso de solidificación en el crecimiento de monocristales y en la solidificación de vidrios y polímeros.

8-1

Importancia tecnológica

La capacidad de usar el fuego para producir, fundir y colar metales como cobre, bronce y acero se considera como un hito importante en la evolución de la especie humana (Fig. 8-1). El uso del fuego para reducir los minerales naturales y obtener metales y aleaciones condujo a la producción de herramientas y otros productos útiles. Hoy, miles de años después, aún se considera que la solidificación es uno de los procesos de manufactura más importantes. Mediante el proceso de vaciado, cada año se producen varios millones de libras de acero, aleaciones de aluminio, cobre y zinc. El proceso de solidificación también se usa para fabricar componentes específicos (por ejemplo, aleación de aluminio para las ruedas de automóviles) [Fig. 8-2(a)]. En la industria se usa también el proceso de solidificación como paso de **procesamiento primario** para producir lingotes (piezas vaciadas sencillas y con frecuencia grandes, que después se procesan para obtener formas útiles). A continuación, los lingotes se trabajan en caliente o en frío, en el **procesamiento secundario**, para obtener formas útiles (como láminas, alambres, varillas, placas, etc.). La solidificación se aplica también cuando se unen materiales metálicos con técnicas como soldadura, latonado y estañado.

También se usa la solidificación para procesar vidrios inorgánicos; por ejemplo, el vidrio de silicato pasa por el proceso de vidrio flotado. Las fibras ópticas de gran calidad [Fig. 8-2(b)] y otros materiales, como la fibra de vidrio, también se producen por la solidificación de vidrios fundidos. Durante la solidificación de vidrios inorgánicos se producen materiales amorfos, no cristalinos. En la fabricación de los vitrocerámicos, primero se da forma a los materiales, vaciando vidrios amorfos, y después se cristalizan con un tratamiento térmico para aumentar su resistencia. Muchos materiales termoplásticos, como el polietileno, cloruro de polivinilo (PVC), polipropileno y otros más, se procesan para obtener formas útiles (como fibras, tubos, botellas, juguetes, utensilios, etc.) con un proceso donde intervienen la fusión y la solidificación.



Figura 8-1 Un objeto de bronce. Esta cantimplora (bian hu) proviene de China, del periodo de los Estados en Guerra, aproximadamente siglo III. Es de bronce repujado con plata. (Cortesía de Freer Gallery of Art, Smithsonian Institution, Washington, D.C.)

Por lo anterior, la solidificación es una tecnología extremadamente importante para controlar las propiedades de productos derivados de la fusión y también como medio para fabricar materiales modernos diseñados. En las siguientes secciones se describirán primero los procesos de nucleación y crecimiento.



(a)



(b)

Figura 8-2 (a) Ruedas de aleación de aluminio para automóviles. (b) Fibras ópticas para comunicaciones. (Cortesía de PhotoDisc/Getty Images.)

8-2

Nucleación

En el contexto de la solidificación, el término **nucleación** indica la formación de los primeros pequeños cristales de nanotamaño en el material fundido. Por ejemplo, cuando el agua comienza a congelarse, primero se forman cristales de hielo de nanotamaño, llamados núcleos. En un sentido más amplio, el término nucleación indica la etapa inicial de la formación de una fase a partir de otra. Cuando un vapor se condensa en un líquido, las gotas de líquido, de tamaño en nanoescala, aparecen cuando comienza la condensación y se llaman **núcleos**. Después veremos también que hay muchos sistemas en los cuales los núcleos de un sólido (β) formarán un material (α) (es decir, transformación de fase α a β). Por ejemplo, las gotitas de agua se nuclean en el vapor de agua. Lo interesante en estas transformaciones es que, en la mayoría de los materiales diseñados, muchas de ellas se efectúan cuando el material está en estado sólido, es decir, no interviene la fusión. En consecuencia, aunque describiremos la nucleación desde una perspectiva de solidificación, es importante hacer notar que el fenómeno de la nucleación es general y está asociado con las transformaciones de fase.

Se espera que un material se solidifique cuando el líquido se enfría justo abajo de su temperatura de solidificación, porque la energía asociada con la estructura cristalina del sólido es menor que la energía del líquido. Esta diferencia de energía entre el líquido y el sólido es la energía libre por unidad de volumen ΔG_v y es la fuerza motriz para la solidificación.

Sin embargo, cuando se forma el sólido se crea una interfaz sólido-líquido (Fig. 8-3). Con esta interfaz se asocia una energía libre superficial σ_{sl} ; cuanto mayor es el sólido, mayor es el aumento de energía superficial. Entonces, el cambio total de energía ΔG , que se muestra en la figura 8-4, es:

$$\Delta G = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v + 4 \pi r^2 \sigma_{sl} \quad (8-1)$$

donde $\frac{4}{3} \pi r^3$ es el volumen de un embrión esférico de radio r , $4 \pi r^2$ es la superficie de un embrión esférico, σ_{sl} es la energía libre superficial de la interfaz sólido-líquido (en este caso) y ΔG_v es el cambio de energía libre por unidad de volumen, que es negativo, porque se supone

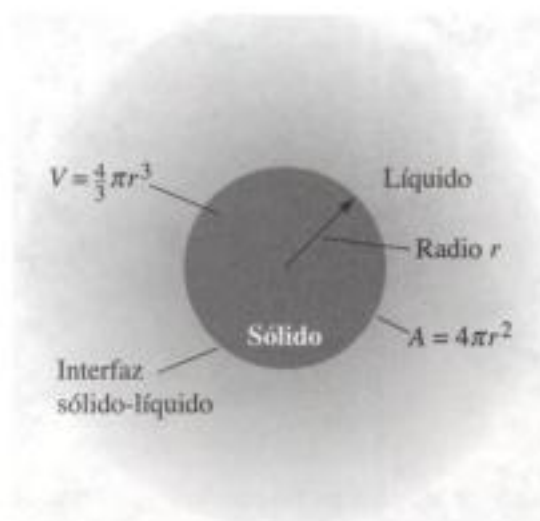


Figura 8-3

Cuando un sólido se forma en el líquido se crea una interfaz.

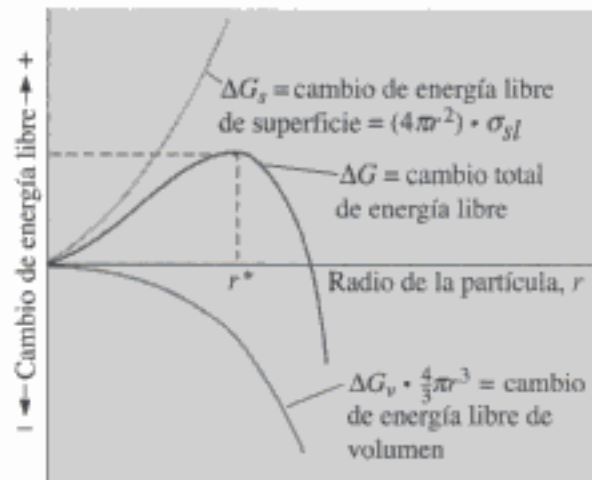


Figura 8-4

La energía libre total del sistema sólido-líquido cambia al cambiar el tamaño del sólido. El sólido es un embrión si su radio es menor que el radio crítico, y es un núcleo si su radio es mayor que el radio crítico.

que la transformación de fase es termodinámicamente factible. Nótese que σ_{sl} no es una función de r y se supone que es constante. ΔG_v tampoco depende de r .

Un **embrión** es una partícula diminuta de sólido que se forma en el líquido cuando se agrupan los átomos. El embrión es inestable, y puede crecer y formar un núcleo estable o redisolverse.

En la figura 8-4, la curva superior muestra la variación parabólica de la energía superficial total ($4\pi r^2 \cdot \sigma_{sl}$). La curva de la parte inferior muestra el cambio total de energía libre de volumen ($\frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \Delta G_v$). La curva intermedia muestra la variación de ΔG . A la temperatura en la cual se espera que las fases sólida y líquida estén en equilibrio termodinámico (por ejemplo, a la temperatura de solidificación), la energía libre de las fases sólida y líquida son iguales ($\Delta G_v = 0$), por lo que el cambio total de energía libre (ΔG) será positivo. Cuando el sólido es muy pequeño, con un radio menor que el **radio crítico** para la nucleación (r^*) (Fig. 8-4), un **crecimiento** mayor hace que aumente la energía libre total. El radio crítico r^* es el tamaño mínimo de un cristal que deben formar los átomos que se agrupan en el líquido para que la partícula sólida sea estable y comience a crecer. Pero, en lugar de crecer, el sólido tiende a volver a fundirse y hacer que la energía libre disminuya; así, el interior del material permanece líquido y queda sólo un pequeño cristal de sólido. A las temperaturas de solidificación, los embriones son termodinámicamente inestables. Entonces ¿por qué pueden crecer?

La formación de embriones es un proceso estadístico. Se forman y se redisuelven muchos embriones. Si por casualidad se forma un embrión que tiene un radio mayor que r^* , el crecimiento posterior hace que la energía libre total disminuya. Entonces, el nuevo sólido es estable y sustentable, porque ha sucedido la nucleación y comienza el crecimiento de la partícula sólida, que para entonces se llama núcleo. A las temperaturas termodinámicas de solidificación, la probabilidad de formar núcleos estables y sustentables es extremadamente pequeña. En consecuencia, la solidificación no comienza a la temperatura termodinámica de solidificación. Si la temperatura continúa decreciendo respecto a la de equilibrio de solidificación, la fase líquida que debería haberse transformado en sólido viene a ser cada vez más inestable termodinámicamente. Como el líquido está abajo de la temperatura de solidificación de equilibrio, se considera subenfriado. El **subenfriamiento** de ΔT es la temperatura de equilibrio de solidificación menos la temperatura real del líquido. Al aumentar el grado de subenfriamiento, la fuerza termodinámica impulsora de la formación de una fase sólida a partir del líquido rebasa la resistencia a la creación de una interfaz sólido-líquido.

Este fenómeno se puede ver en muchas otras transformaciones de fase. Cuando una fase sólida (α) se transforma en otra fase sólida (β), es necesario enfriar el sistema a una temperatura menor que la temperatura termodinámica de transformación de fase, en la cual las energías libres de las fases α y β son iguales. Cuando un líquido se transforma en un vapor (por ejemplo, agua hirviendo), se crea una burbuja de vapor en el líquido. Sin embargo, para crear la transformación se necesita **sobrecalentar** el líquido arriba de su temperatura de ebullición. Por consiguiente, se puede observar que los líquidos ¡en realidad no se solidifican a su temperatura de fusión y en realidad no hierven en su punto de ebullición! ¡Es necesario subenfriar el líquido para que se solidifique, y sobrecalentarlo para que hierva!

Nucleación homogénea A medida que el líquido se enfría a temperaturas inferiores a la de solidificación de equilibrio, se combinan dos factores que favorecen la nucleación. El primero es que, como los átomos están perdiendo su energía térmica, la probabilidad de formar grupos y embriones mayores aumenta. En segundo lugar, la mayor diferencia de energía libre de volumen entre el líquido y el sólido hace reducir el tamaño crítico r^* del núcleo. La **nucleación homogénea** se presenta cuando el subenfriamiento es lo suficientemente grande como para causar la formación de un núcleo estable.

El tamaño del radio crítico se determina con

$$r^* = \frac{2\sigma_{sl} T_m}{\Delta H_f \Delta T} \quad (8-2)$$

donde ΔH_f es el calor latente de fusión, T_m es la temperatura de solidificación de equilibrio en Kelvin y $\Delta T = (T_m - T)$ es el subenfriamiento cuando la temperatura del líquido es T . El calor latente de fusión representa el calor cedido durante la transformación de líquido a sólido. Conforme aumenta el subenfriamiento, el radio crítico necesario para la nucleación disminuye. La tabla 8-1 presenta valores de σ_{sl} , ΔH_f y subenfriamientos típicos observados de manera experimental para una nucleación homogénea.

El siguiente ejemplo indica cómo calcular el radio crítico del núcleo en la solidificación del cobre.

TABLA 8-1 ■ Valores de temperatura de solidificación, calor latente de fusión, energía de superficie y subenfriamiento máximo para algunos materiales

	Temperatura de solidificación (T_m)	Calor de fusión (ΔH_f)	Energía interfacial sólido-líquido (σ_{sl})	Subenfriamiento normal para nucleación homogénea (ΔT)
Metal	(°C)	(J/cm ³)	(J/cm ²)	(°C)
Ga	30	488	56×10^{-7}	76
Bi	271	543	54×10^{-7}	90
Pb	327	237	33×10^{-7}	80
Ag	962	965	126×10^{-7}	250
Cu	1085	1628	177×10^{-7}	236
Ni	1453	2756	255×10^{-7}	480
Fe	1538	1737	204×10^{-7}	420
NaCl	801			169
CsCl	645			152
H ₂ O	0			40

EJEMPLO 8-1**Cálculo del radio crítico en la solidificación del cobre**

Calcule el tamaño del radio crítico y el número de átomos en el núcleo crítico cuando se forma cobre sólido por nucleación homogénea. Comente el tamaño del núcleo y las hipótesis que se hicieron al deducir la ecuación del radio del núcleo.

SOLUCIÓN

Según la tabla 8-1,

$$\Delta T = 236^\circ\text{C} \quad T_m = 1085 + 273 = 1358 \text{ K}$$

$$\Delta H_f = 1628 \text{ J/cm}^3$$

$$\sigma_s = 177 \times 10^{-7} \text{ J/cm}^2$$

$$r^* = \frac{2\sigma_s T_m}{\Delta H_f \Delta T} = \frac{(2)(177 \times 10^{-7})(1358)}{(1628)(236)} = 12.51 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

El parámetro de red para el cobre FCC es $a_0 = 0.3615 \text{ nm} = 3.615 \times 10^{-8} \text{ cm}$

$$V_{\text{celda unitaria}} = (a_0)^3 = (3.615 \times 10^{-8})^3 = 47.24 \times 10^{-24} \text{ cm}^3$$

$$V_{r^*} = \frac{4}{3}\pi r^3 = \left(\frac{4}{3}\pi\right)(12.51 \times 10^{-8})^3 = 8200 \times 10^{-24} \text{ cm}^3$$

La cantidad de celdas unitarias en el núcleo crítico es

$$\frac{8200 \times 10^{-24}}{47.24 \times 10^{-24}} = 174 \text{ celdas unitarias}$$

Puesto que en los metales FCC hay cuatro átomos en cada celda unitaria, el número de átomos en cada núcleo crítico debe ser:

$$(4 \text{ átomos/celda}) (174 \text{ celdas/núcleo}) = 696 \text{ átomos/núcleo}$$

En estos cálculos, se supone que un núcleo está formado únicamente por unos cuantos cientos de átomos y aún muestra propiedades parecidas a las de los materiales a granel. Esto no es correcto en sentido estricto y, como tal, debe considerarse como punto débil de la teoría clásica de la nucleación.

Nucleación heterogénea En la tabla 8-1, se observa que el agua no se solidificará formando hielo por nucleación homogénea ¡sino hasta llegar a una temperatura de -40°C (40°C de subenfriamiento)! Excepto en experimentos controlados en el laboratorio, nunca sucede la nucleación homogénea en los líquidos. En lugar de ello, las impurezas en contacto con el líquido, ya sea que estén suspendidas en él o en las paredes del recipiente que lo contiene, proporcionan una superficie en la que se puede formar el sólido (Fig. 8-5). En este caso se alcanza un radio de curvatura mayor que el radio crítico con superficie total muy pequeña entre el sólido y el líquido. Sólo deben agruparse unos pocos átomos para producir una partícula sólida que tenga el radio de curvatura necesario. Se requiere un subenfriamiento mucho menor para alcanzar el tamaño crítico, y la nucleación se lleva a cabo con más facilidad. La nucleación en las superficies preexistentes se llama **nucleación heterogénea**. Este proceso depende del ángulo de contacto (θ) entre la fase que nuclea y la superficie donde sucede la nucleación. La misma clase de fenómeno se lleva a cabo en las transformaciones en estado sólido.

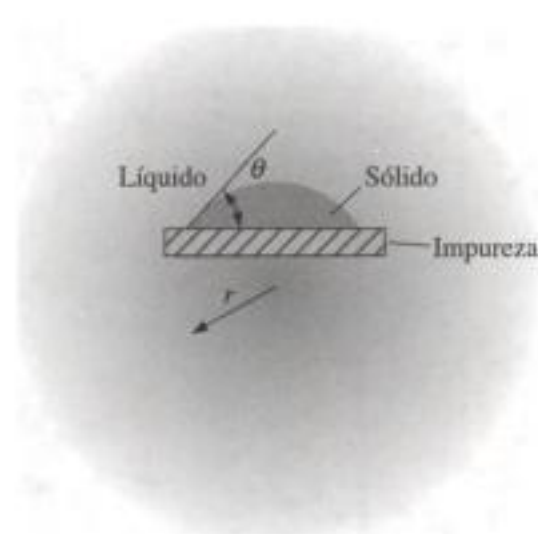


Figura 8-5

Un sólido que se forme sobre una impureza puede tener el radio crítico con menor aumento de energía de superficie. Así, la nucleación heterogénea puede efectuarse con relativamente poco subenfriamiento.

Velocidad de nucleación La **velocidad de nucleación** se define como la cantidad de núcleos formados por unidad de tiempo, y es una función de la temperatura. Naturalmente, antes de la solidificación no hay nucleación, y a temperaturas mayores que el punto de solidificación, la velocidad de nucleación es cero. Al bajar la temperatura, aumenta la fuerza motriz para la nucleación. Sin embargo, al bajar la temperatura, la difusión atómica se hace más lenta y, en consecuencia, se hace más lento el proceso de la nucleación. Entonces, una velocidad normal de nucleación (I) llega a un máximo a determinada temperatura menor que la de transformación (Fig. 8-6). En la nucleación heterogénea, la velocidad de nucleación está determinada por la concentración de los agentes nucleantes que se introducen. Si se tienen en cuenta la velocidad de la nucleación y la del crecimiento, se puede predecir la velocidad total de una transformación de fase.

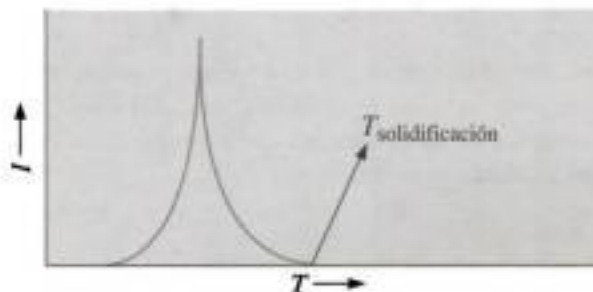


Figura 8-6

Velocidad de nucleación (I) en función de la temperatura del líquido (T).

8-3 Aplicaciones de la nucleación controlada

Endurecimiento por tamaño de grano Cuando se solidifica una pieza metálica vaciada, las impurezas en el material fundido y en las paredes del molde en el que se hace la solidificación actúan como sitios de nucleación heterogénea. A veces se introducen intencionalmente partículas nucleantes en el líquido. A esas prácticas se les llama **refinamiento del grano** o **inoculación**. Las sustancias que se agregan a los metales fundidos para promover la nucleación y, en consecuencia, un tamaño más fino de grano, se llaman **refinadores de grano** o **inoculantes**. Por ejemplo, a muchas aleaciones líquidas de aluminio se les agrega una combinación de 0.03% de titanio (Ti) y 0.01% de boro (B); se forman partículas diminutas de aluminio titanio (Al_3Ti) o de diboruro de titanio (TiB_2) y sirven como sitios para nucleación heterogénea. La refinación

del grano o inoculación produce mayor cantidad de granos, cada uno de los cuales comienza a crecer a partir de un núcleo. Una mayor superficie de límite de grano proporciona endurecimiento por tamaño de grano a los materiales metálicos. Esto se describió con la ecuación de Hall-Petch en los capítulos 3 y 4.

Fortalecimiento por segunda fase En los capítulos 4 y 5 aprendimos que, en los materiales metálicos, los límites de grano o la formación de precipitados ultrafinos de una segunda fase, pueden resistir el movimiento de las dislocaciones. El endurecimiento de los materiales con precipitados ultrafinos se llama **endurecimiento por dispersión o por segunda fase**; se utiliza ampliamente para mejorar las propiedades mecánicas de muchas aleaciones. Este proceso implica **transformaciones de fase en estado sólido**; es decir, que un sólido se transforma en otro cuyos límites de grano de la fase que se transforma (α) y los defectos dentro de los granos, a nivel atómico, de la fase original sirven con frecuencia como sitios de nucleación homogénea de la nueva fase (β). Este fenómeno de nucleación desempeña un papel crítico en los mecanismos de endurecimiento; se describirá en los capítulos 9 y 10.

Vidrios Para grandes velocidades de enfriamiento y/o materiales fundidos de gran viscosidad, es posible que el tiempo para que se formen y crezcan los núcleos sea insuficiente. Cuando eso sucede, la estructura líquida queda fija en su lugar y se forma un sólido amorfo o vítreo. La estructura cristalina compleja de muchos materiales cerámicos y poliméricos evita la nucleación de una estructura cristalina sólida, aun a bajas velocidades de enfriamiento. Sin embargo, en los materiales metálicos se requieren velocidades de enfriamiento de 10^6 °C/s o mayores, para suprimir la nucleación de los cristales. A la producción de vidrios metálicos, así como de otras estructuras únicas, por enfriamiento rápido se le ha llamado **procesamiento por solidificación rápida**. Las grandes velocidades de enfriamiento se obtienen usando partículas ultrafinas de polvo metálico o formando cintas metálicas delgadas y continuas, de aproximadamente 0.0015 pulg de espesor. Muchos polvos de aleación preparados rociando metales fundidos tienden a contener cristalitas muy pequeños; es decir, pueden ser microcristalinos.

Como ejemplos de vidrios metálicos están las aleaciones complejas de hierro, níquel y boro, que contienen cromo, fósforo, cobalto y otros elementos. Algunos vidrios metálicos pueden tener resistencias mayores que 500 000 psi y conservar a la vez una tenacidad a la fractura mayor que 10 000 psi $\sqrt{\text{pulg}}$. Su excelente resistencia a la corrosión, propiedades magnéticas y otras propiedades físicas hacen atractivos a estos materiales para aplicaciones relacionadas con la energía eléctrica, motores de aviación, herramientas y moldes, así como con el magnetismo.

Entre otros ejemplos de materiales que usan la nucleación controlada, se encuentran el vidrio de colores y el **vidrio fotocromático** (que puede cambiar de color o de matiz al exponerlo a la luz solar). En esos materiales, por lo demás amorfos, se nuclean deliberadamente cristalitas de nanotamaño, de diversos materiales. Los cristales son pequeños y, en consecuencia, no opacan al vidrio. Tienen propiedades ópticas especiales que hacen que el vidrio tenga colores brillantes, o sea fotocromático. La nucleación controlada en vidrios amorfos se puede usar para preparar pequeños cristales de nanotamaño de semiconductores, llamados **puntos cuánticos**, que tienen propiedades eléctricas y ópticas especiales.[3] Por ejemplo, el ancho de banda de las estructuras semiconductoras de punto cuántico es distinto del de los materiales conductores en masa.

Muchos materiales que se forman en una fase de vapor pueden enfriarse con rapidez para que no cristalicen y, en consecuencia, sean amorfos (por ejemplo, el silicio amorfo). La clave es que los materiales amorfos o no cristalinos *no siempre* tienen que formarse a partir de materiales fundidos.

Vitrocerámicos El término **vitrocerámico** se refiere a materiales diseñados que comienzan como vidrios amorfos y terminan como cerámicos cristalinos, con un tamaño ultrafino de grano.[4] Esos materiales casi no contienen porosidades, son mecánicamente más resistentes y con frecuencia son mucho más resistentes al choque térmico. La nucleación no se lleva a cabo con facilidad en los vidrios de silicato. Sin embargo, se puede promover introduciendo agentes

nucleantes, como titanio (TiO_2) y zirconio (ZrO_2). Los vitrocerámicos diseñados aprovechan la facilidad con que se pueden fundir y moldear los vidrios. Una vez moldeado un vidrio, se puede calentar para formar en él deliberadamente cristales ultrafinos, para obtener un material con una considerable tenacidad mecánica y resistencia al choque térmico. La cristalización de los vitrocerámicos continúa hasta que cristaliza todo el material (se puede obtener hasta un 99.9% de cristalinidad). Si se mantiene pequeño el tamaño de grano (~ 50 a 100 nm), con frecuencia se puede hacer que los vitrocerámicos sean transparentes. Todos los vidrios terminan por cristalizar al exponerlos a altas temperaturas durante largos periodos. Sin embargo, la cristalización debe ser controlada, por lo que no toda formulación de vidrio se puede convertir en un vitrocerámico. Como se describió en el capítulo 3, Donald Stookey, de Corning, y George Beall fueron quienes ayudaron a desarrollar algunos de los primeros vitrocerámicos.[4] En realidad, el proceso de nucleación controlada en los materiales amorfos forma la base de esta fascinante clase de materiales. Algunos ejemplos de materiales que se pueden transformar en vitrocerámicos útiles[5] son formulaciones específicas de vidrios que contienen $\text{Li}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ y $\text{BaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$.

Nucleación de gotitas de agua y formación de cristales de hielo Es posible inyectar cristales ultrafinos en las nubes para promover la nucleación heterogénea de agua líquida ¡que se transforma en lluvia! De igual modo, en los albergues de esquí se usa el proceso de nucleación heterogénea en forma deliberada ¡para hacer nieve con sus máquinas de fabricación de nieve! Como agente nucleante heterogéneo se usa Snomax™, una bacteria *Pseudomonas syringae* secada y congelada. La proteína no es tóxica y no es patógena.[6]

84

Mecanismos de crecimiento

Una vez que se forman los núcleos sólidos de una fase (en un líquido o en otra fase sólida), comienza el crecimiento conforme se fijan más átomos a la superficie del sólido. En esta descripción, nos concentraremos en la nucleación y el crecimiento de cristales en un líquido. La naturaleza del crecimiento de los núcleos sólidos depende de cómo se elimina el calor del material fundido. Examinemos, por ejemplo, el vaciado de un metal fundido en su molde. Supondremos que tenemos un metal casi puro, y no una aleación, porque, en la mayoría de los casos, la solidificación de las aleaciones es distinta (dado que se lleva a cabo dentro de un intervalo de temperaturas). En el proceso de solidificación, se deben eliminar dos clases de calor: el calor específico del líquido y el calor latente de fusión. El **calor específico** es el que se requiere para cambiar un grado la temperatura de un peso unitario del material. Primero, se debe eliminar el calor específico, ya sea por radiación a la atmósfera cercana o por conducción hacia el molde que lo rodea, hasta que el líquido se enfría a su temperatura de solidificación. No es más que enfriar el líquido de una temperatura hasta la temperatura a la cual comienza la nucleación.

Sabemos que para fundir un sólido se debe suministrar calor. En consecuencia, cuando los cristales de un sólido se forman en un líquido ¡se genera calor! A esta clase de calor se le llama **calor latente de fusión**, ΔH_f . Se debe eliminar el calor latente de fusión de la interfaz sólido-líquido para que se complete la solidificación. La forma en que se elimina el calor latente de fusión determina el mecanismo de crecimiento del material y la estructura final de una pieza colada.

Crecimiento planar Cuando un líquido bien inoculado (es decir, que contenga agentes nucleantes) se enfría bajo condiciones de equilibrio, no hay necesidad de subenfriarlo, porque puede presentarse la nucleación heterogénea. En consecuencia, la temperatura del líquido por delante del **frente de solidificación**, o sea la interfaz sólido-líquido, es mayor que la temperatura de solidificación. La temperatura del sólido está a la temperatura de solidificación o a una temperatura menor. Durante la solidificación, el calor latente de fusión se elimina por conducción, a partir de la interfaz sólido-líquido. Toda pequeña protuberancia que comienza a crecer en la interfaz está rodeada de líquido a mayor temperatura que la de solidificación

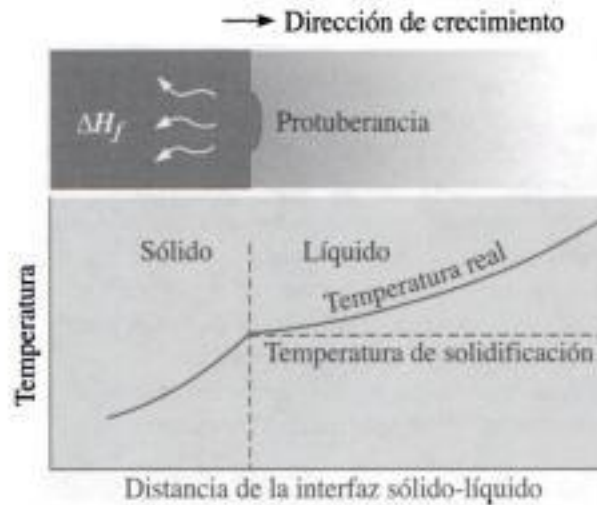


Figura 8-7
Cuando la temperatura del líquido es mayor que la temperatura de solidificación, no crece una protuberancia en la interfaz sólido-líquido, y se mantiene una interfaz plana. El calor latente se elimina de la interfaz a través del sólido.

(Fig. 8-7). Entonces se detiene el crecimiento de la protuberancia hasta que se empareja con el resto de la interfaz. A este mecanismo de crecimiento se le llama **crecimiento plano**, y se efectúa por el movimiento de una interfaz sólido-líquido lisa hacia el líquido.

Crecimiento dendrítico Cuando el líquido no se inocula y la nucleación es mala, se debe subenfriar el líquido para que se forme el sólido (Fig. 8-8). Bajo estas condiciones, una

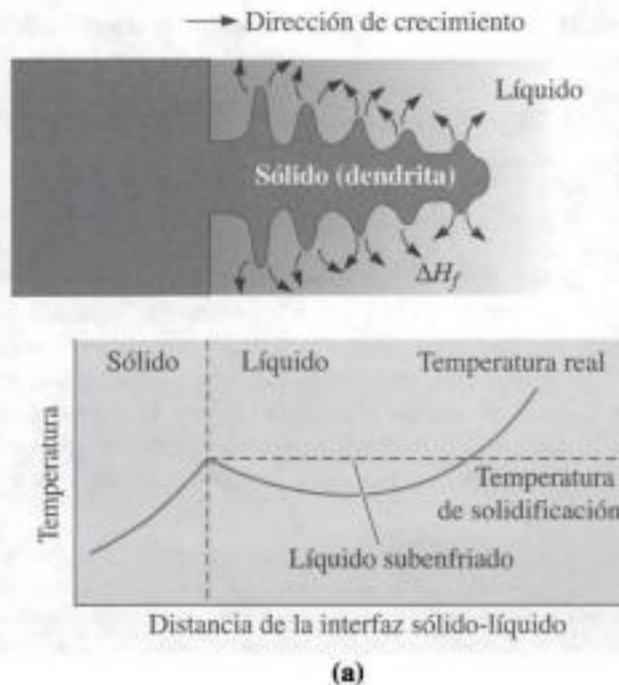


Figura 8-8 (a) Si el líquido está subenfriado, una protuberancia en la interfaz sólido-líquido puede crecer con rapidez formando una dendrita. El calor latente de fusión se elimina elevando la temperatura del líquido, hasta la temperatura de solidificación. (b) Micrografía electrónica de barrido de dendritas en el acero (15×).

pequeña protuberancia llamada **dendrita**, la cual se forma en la interfaz, puede incrementar su crecimiento, porque el líquido por delante del frente de solidificación está subenfriado. La palabra dendrita proviene de la palabra griega *dendron*, que significa árbol. Al crecer la dendrita sólida, el calor latente de fusión pasa hacia el líquido subenfriado, elevando su temperatura hacia la temperatura de solidificación. También pueden formarse brazos secundarios y terciarios de dendrita sobre los tallos primarios, para acelerar el desprendimiento del calor latente. El crecimiento dendrítico continúa hasta que el líquido subenfriado se calienta a la temperatura de solidificación. Después, todo el líquido que queda se solidifica por crecimiento plano. La diferencia entre los crecimientos dendrítico y plano aumenta por los distintos sumideros del calor latente de fusión. El molde debe absorber el calor en el crecimiento plano, pero el líquido subenfriado absorbe el calor en el crecimiento dendrítico.

En los metales puros, el crecimiento dendrítico representa, normalmente, sólo una pequeña fracción del crecimiento total y se determina con la ecuación:

$$\text{Fracción dendrítica} = f = \frac{c\Delta T}{\Delta H_f} \quad (8-3)$$

donde c es el calor específico del líquido. El numerador representa el calor que puede absorber el líquido subenfriado, y el calor latente en el denominador representa el calor total que se debe retirar durante la solidificación. Al aumentar la ΔT del subenfriamiento, ocurre más crecimiento dendrítico. Si el líquido está bien inoculado, el subenfriamiento es casi cero, y el crecimiento sería principalmente a través del mecanismo de solidificación de frente plano.

8-5 Tiempo de solidificación y tamaño de dendrita

La rapidez con que se efectúa el crecimiento del sólido depende de la velocidad de enfriamiento, es decir, la rapidez de extracción del calor. Una mayor velocidad de crecimiento produce una solidificación rápida, o tiempos cortos de solidificación. El tiempo t_s requerido para que se solidifique por completo una pieza colada simple se puede calcular con la **regla de Chvorinov**: [7]

$$t_s = B \left(\frac{V}{A} \right)^n \quad (8-4)$$

donde V es el volumen de la pieza y representa la cantidad de calor que debe eliminarse para que haya solidificación; A es la superficie de la pieza en contacto con el molde, y representa la superficie desde la cual se puede disipar el calor de la pieza, n es una constante (por lo general, aproximadamente 2) y B es la **constante del molde**. Esta constante depende de las propiedades y las temperaturas iniciales, tanto del metal como del molde. Esta regla tiene en cuenta básicamente la geometría de una pieza colada y las condiciones de transferencia de calor. Indica que, bajo las mismas condiciones, una pieza con pequeño volumen y superficie relativamente grande se enfría con más rapidez.

EJEMPLO 8-2

Rediseño de una pieza vaciada para mejorar su resistencia

Su empresa produce en la actualidad una pieza vaciada de latón, en forma de disco, de 2 pulg de espesor y 18 pulg de diámetro. Usted cree que si esa pieza se pudiera solidificar un 25% más rápidamente, la mejora de sus propiedades a la tensión permitirán fabricarla con menor peso. Diseñe el proceso de colado que permita esto. Suponga que la constante del molde es de 22 min/pulg² para este proceso.

SOLUCIÓN

Un método sería usar el mismo proceso de vaciado, pero reducir el espesor de la pieza. La pieza más delgada se solidificaría con más rapidez y, debido al enfriamiento más rápido, debería tener mejores propiedades mecánicas. Con la regla de Chvorinov se puede calcular el espesor requerido. Si d es el diámetro y x es el espesor de la pieza, entonces el volumen, la superficie y el tiempo de solidificación de la pieza de 2 pulg de espesor serán:

$$V = (\pi/4)d^2x = (\pi/4)(18)^2(2) = 508.9 \text{ pulg}^3$$

$$A = 2(\pi/4)d^2 + \pi dx = 2(\pi/4)(18)^2 + \pi(18)(2) = 622 \text{ pulg}^2$$

$$t = B\left(\frac{V}{A}\right)^2 = (22)\left(\frac{508.9}{622}\right)^2 = 14.72 \text{ min}$$

El tiempo de solidificación de la pieza rediseñada debería ser 25% menor que el tiempo actual, es decir, $t_r = 0.75t$, en donde:

$$t_r = 0.75t = (0.75)(14.72) = 11.04 \text{ min}$$

Como no han cambiado las condiciones del colado, la constante de molde B no cambia. La relación V/A de la nueva pieza colada es:

$$t_r = B\left(\frac{V}{A}\right)^2 = (22)\left(\frac{V}{A}\right)^2 = 11.04 \text{ min}$$

$$\left(\frac{V}{A}\right)^2 = 0.5018 \text{ pulg}^2 \quad \text{o sea} \quad \frac{V}{A} = 0.708 \text{ pulg}$$

Si x es el espesor necesario de la pieza rediseñada, entonces:

$$\frac{V_r}{A_r} = \frac{(\pi/4)d^2x}{2(\pi/4)d^2 + \pi dx} = \frac{(\pi/4)(18)^2(x)}{2(\pi/4)(18)^2 + \pi(18)(x)} = 0.708 \text{ pulg}$$

Por tanto, $x = 1.68$ pulgadas.

Con este espesor se obtiene el tiempo de solidificación requerido y se reduce el peso general de la pieza casi en 15%.

La solidificación comienza en la superficie, donde el calor se disipa hacia el material del molde que lo rodea. La velocidad de solidificación de una pieza puede describirse por la rapidez con que crece el espesor d de la cáscara solidificada:

$$d = k_{\text{solidificación}} \sqrt{t} - c_1, \quad (8-5)$$

donde t es el tiempo después del vertido, $k_{\text{solidificación}}$ es una constante para determinado material y molde de la pieza, y c_1 es una constante relacionada con el tiempo de vertido.

Efecto sobre la estructura y las propiedades El tiempo de solidificación afecta el tamaño de las dendritas. Normalmente, el tamaño de una dendrita se caracteriza midiendo la distancia entre sus brazos secundarios (Fig. 8-9). La **distancia entre brazos dendríticos secundarios** (SDAS, por sus siglas en inglés) se reduce cuando la pieza se solidifica con mayor rapidez. La red de dendritas más fina y más extendida funciona como un conductor más eficiente del calor latente hacia el líquido subenfriado. Este SDAS se relaciona con el tiempo de solidificación con la ecuación

$$\text{SDAS} = k t_r^m, \quad (8-6)$$

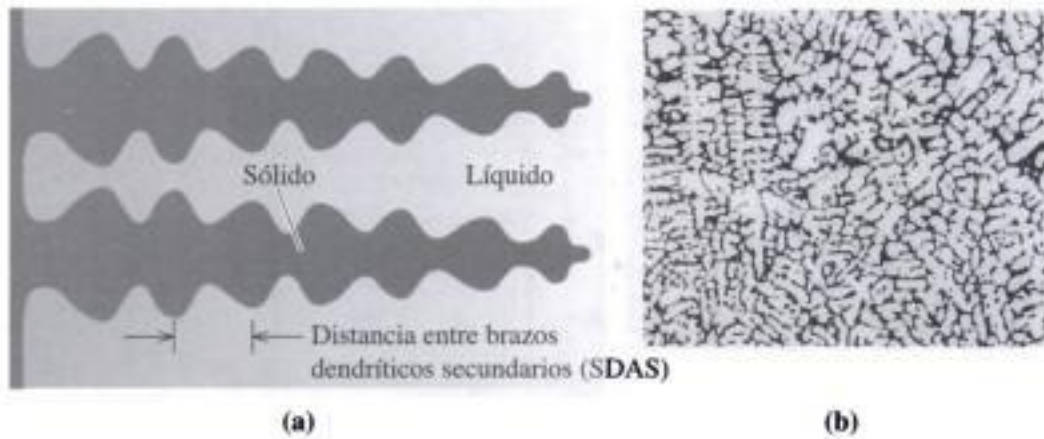


Figura 8-9 (a) Distancia entre brazos dendríticos secundarios (SDAS). (b) Dendritas en una aleación de aluminio (50 $\times$). (De ASM Handbook, vol. 9, *Metallography and Microstructure* (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)

donde m y k son constantes que dependen de la composición del metal. Esta relación se muestra en la figura 8-10 para diversas aleaciones. Las distancias pequeñas entre brazos secundarios de dendrita se relacionan con mayores resistencias y mejor ductilidad (Fig. 8-11).

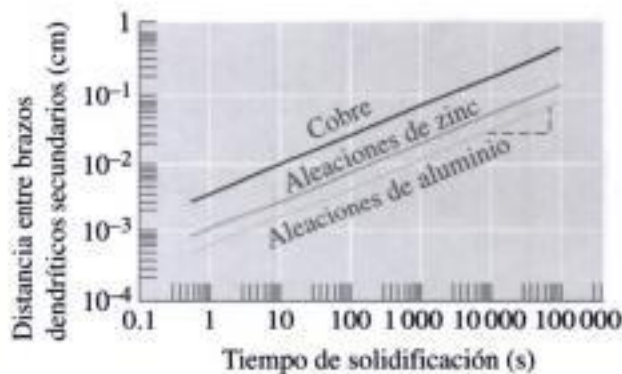


Figura 8-10 Efecto del tiempo de solidificación sobre las distancias entre brazos dendríticos secundarios en el cobre, zinc y aluminio.

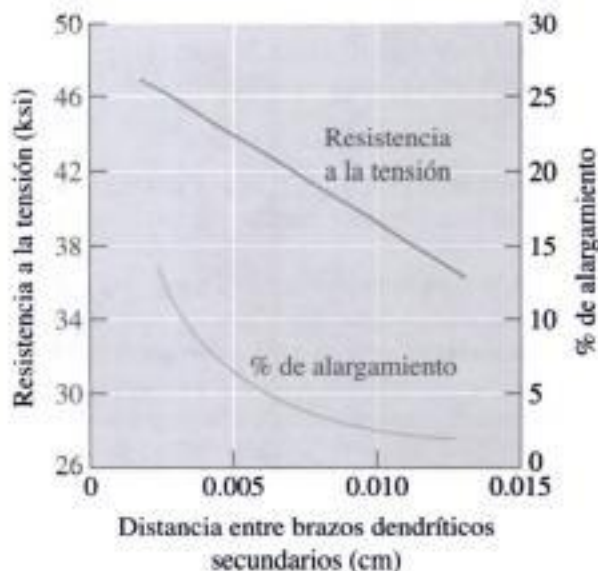


Figura 8-11 Efecto de la distancia entre brazos dendríticos secundarios sobre las propiedades de una aleación colada de aluminio.

El procesamiento por solidificación rápida se usa para producir distancias entre brazos de dendrita secundaria excepcionalmente pequeños; un método común consiste en producir gotitas líquidas muy finas que se congelan formando partículas sólidas. A este proceso se le llama atomización. Las gotitas diminutas se solidifican a una velocidad aproximada de 10^4 °C/s, produciendo partículas de polvo de ~ 5 a $100\ \mu\text{m}$. Esta rapidez de enfriamiento no es suficiente para formar un vidrio metálico, pero sí produce una estructura dendrítica fina. Al consolidar con cuidado las gotitas sólidas con procesos de metalurgia de polvos, se pueden obtener mejores propiedades en el material. Como las partículas se derivan de un material fundido, se pueden producir muchas composiciones complejas de aleación en forma de polvos químicamente homogéneos.

Los tres siguientes ejemplos describen cómo se pueden usar la regla de Chvorinov, la relación entre SDAS y el tiempo de solidificación, y entre SDAS y las propiedades mecánicas, para diseñar un proceso de fundición.

EJEMPLO 8-3

Distancia entre brazos secundarios de dendrita para aleaciones de aluminio

Determine las constantes en la ecuación que describe la relación de espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios y el tiempo de solidificación para aleaciones de aluminio (Fig. 8-10).

SOLUCIÓN

Se podría obtener el valor de SDAS en dos puntos de la gráfica y calcular k y m usando ecuaciones simultáneas. Sin embargo, si las escalas en la ordenada y abscisa son iguales para potencias de 10, como en la figura 8-10, se puede obtener la pendiente m de línea en la gráfica log-log midiéndola directamente. En la figura 8-10 se pueden marcar cinco unidades iguales en la escala vertical, y 12 en la horizontal. La pendiente es:

$$m = \frac{5}{12} = 0.42$$

La constante k es el valor de SDAS cuando $t_s = 1$ s, ya que

$$\log \text{SDAS} = \log k + m \log t_s$$

Si $t_s = 1$ s, $m \log t_s = 0$ y $\text{SDAS} = k$, de acuerdo con la figura 8-10:

$$k = 8 \times 10^{-4} \frac{\text{cm}}{\text{s}^m}$$

EJEMPLO 8-4

Tiempo de solidificación

Una barra de aluminio de 4 pulg de diámetro se solidifica hasta una profundidad de 0.5 pulg bajo la superficie en 5 minutos. Después de 20 minutos, la barra se ha solidificado hasta una profundidad de 1.5 pulg. ¿Cuánto tiempo más se requiere para que solidifique por completo?

SOLUCIÓN

De acuerdo con nuestras mediciones, se pueden determinar las constantes $k_{\text{solidificación}}$ y c_1 de la ecuación 8-5:

$$0.5 \text{ pulg} = k_{\text{solidificación}} \sqrt{(5 \text{ min})} - c_1 \quad \text{o sea} \quad c_1 = k\sqrt{5} - 0.5$$

$$1.5 \text{ pulg} = k_{\text{solidificación}} \sqrt{(20 \text{ min})} - c_1 = k\sqrt{20} - (k\sqrt{5} - 0.5)$$

$$1.5 = k_{\text{solidificación}}(\sqrt{20} - \sqrt{5}) + 0.5$$

$$k_{\text{solidificación}} = \frac{1.5 - 0.5}{4.472 - 2.236} = 0.447 \frac{\text{pulg}}{\sqrt{\text{min}}}$$

$$c_1 = (0.447)\sqrt{5} - 0.5 = 0.4995 \text{ pulg}$$

La solidificación termina cuando $d = 2$ pulg, la mitad del diámetro, ya que está ocurriendo desde todas las superficies:

$$2 = 0.447\sqrt{t} - 0.4995$$

$$\sqrt{t} = \frac{2 + 0.4995}{0.447} = 5.59$$

$$t = 31.27 \text{ min}$$

En la práctica, se encontraría que el tiempo total de solidificación es algo mayor que 31.27 min. Conforme continúa la solidificación, el molde se pone más caliente y es menos eficaz para eliminar el calor de la pieza colada.

EJEMPLO 8-5 *Diseño de una pieza vaciada de aleación de aluminio*

Diseñe el espesor de una pieza de aleación de aluminio cuya longitud es de 12 pulg y su ancho es de 8 pulg, para obtener una resistencia a la tensión de 40 000 psi. La constante del molde en la regla de Chvorinov para aleaciones de aluminio coladas en molde de arena es 45 min/pulg². Suponga que se pueden usar los datos de las figuras 8-10 y 8-11.

SOLUCIÓN

Para obtener una resistencia a la tensión de 42 000 psi, se requiere una distancia entre brazos dendríticos secundarios de 0.007 cm, aproximadamente (véase la Fig. 8-11). De acuerdo con la figura 8-10 podemos determinar que el tiempo de solidificación requerido para obtener esta distancia es de unos 300 segundos, es decir 5 minutos.

De la regla de Chvorinov:

$$t_s = B \left(\frac{V}{A} \right)^2$$

donde $B = 45 \text{ min/pulg}^2$ y x es el espesor de la pieza. Como la longitud es de 12 pulg y el ancho es de 8 pulg:

$$V = (8)(12)(x) = 96x$$

$$A = (2)(8)(12) + (2)(x)(8) + (2)(x)(12) = 40x + 192$$

$$5 \text{ min} = (45 \text{ min/pulg}^2) \left(\frac{96x}{40x + 192} \right)^2$$

$$\frac{96x}{40x + 192} = \sqrt{(5/45)} = 0.333$$

$$96x = 13.33x + 63.9$$

$$x = 0.77 \text{ pulg}$$

Podemos resumir nuestro análisis hasta este punto examinando una curva de enfriamiento, en la cual se muestra cómo varía la temperatura de un material (en este caso un metal puro) con el transcurso del tiempo [Fig. 8-12(a) y (b)]. El líquido se vierte en un molde a la temperatura de vaciado, punto A. La diferencia entre la temperatura de vaciado y la de solidificación es el sobrecalentamiento. El líquido se enfría cuando el molde extrae su calor específico, hasta que llega a la temperatura de solidificación (punto B). Si el líquido no está bien inoculado, debe subenfriarse (punto B a C). La pendiente de la curva de enfriamiento antes de que se inicie la solidificación es la velocidad de enfriamiento, $\frac{\Delta T}{\Delta t}$. Cuando comienza la nucleación (punto C), se cede el calor latente de fusión y la temperatura aumenta. Este aumento de temperatura del líquido subenfriado como resultado de la nucleación se llama **recallescencia** (punto C a D). La solidificación avanza isotérmicamente a la temperatura de fusión (punto D a E) a medida que el calor latente cedido de la solidificación continua se contrarresta con el calor perdido

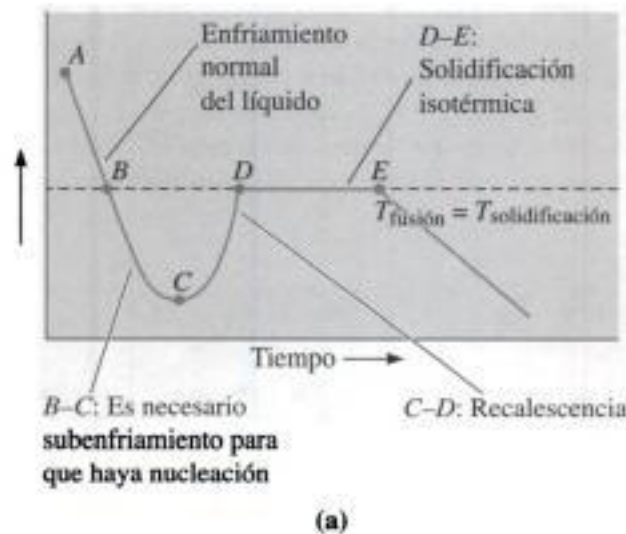
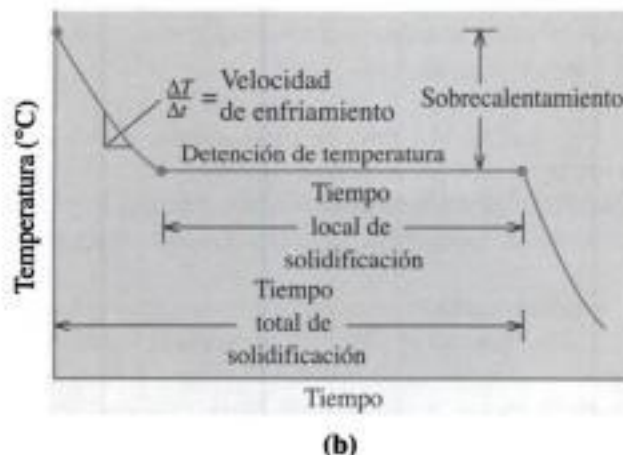


Figura 8-12
(a) Curva de enfriamiento de un metal puro que no fue bien inoculado. El líquido se enfría al eliminar su calor específico (entre los puntos A y B). Por tanto, es necesario el subenfriamiento (entre los puntos B y C). Al comenzar la nucleación (punto C), el calor latente de fusión se desprende, causando un aumento en la temperatura del líquido. A este proceso se le llama recallescencia (del punto C al punto D). El metal continúa solidificándose a temperatura constante ($T_{\text{fusión}} = T_{\text{solidificación}}$). En el punto E, la solidificación es completa. La pieza sólida continúa enfriándose a partir de ese punto. (b) Curva de enfriamiento para un metal bien inoculado, pero por lo demás puro. No se necesita subenfriamiento. No se observa la recallescencia. La solidificación comienza en la temperatura de fusión.



por enfriamiento. La región entre los puntos *D* y *E*, donde la temperatura es constante, se llama **meseta térmica**. Se produce una meseta térmica debido a que el desprendimiento del calor latente de fusión se equilibra con el calor que se pierde por el enfriamiento. En el punto *E*, la solidificación ha finalizado y la pieza colada sólida se enfría desde el punto *E* hasta la temperatura ambiente.

Si el líquido está bien inoculado, el grado de subenfriamiento suele ser muy pequeño. El subenfriamiento y la meseta térmica son muy pequeños, y se puede observar en las curvas de enfriamiento sólo con mediciones muy cuidadosas. Si se encuentran núcleos heterogéneos eficaces en el líquido, la solidificación comienza a la temperatura de solidificación [Fig. 8-12(b)]. El calor latente mantiene el líquido restante a la temperatura de solidificación, hasta que se ha solidificado todo y ya no se puede desprender más calor latente. El crecimiento en estas condiciones es plano. El **tiempo total de solidificación** de la pieza es el necesario para eliminar tanto el calor específico del líquido como el calor latente de fusión. Si se mide desde el momento de vaciado hasta que termina la solidificación, este tiempo se determina con la regla de Chvorinov. El **tiempo local de solidificación** de la pieza es el necesario para eliminar sólo el calor latente de fusión en determinado lugar en la fundición; se mide a partir del momento en que comienza la solidificación hasta que ésta termina. Los tiempos locales de solidificación (y los tiempos totales de solidificación) para los líquidos que se solidifican pasando por subenfriamiento o por inoculación son un poco diferentes.

Con frecuencia usamos los términos “temperatura de fusión” y “temperatura de solidificación” al describir la solidificación. Sería más exacto usar el término “temperatura de fusión” para describir cuando un sólido se convierte por completo en un líquido. Para los metales puros y compuestos (intermetálicos), esto sucede a una temperatura fija (suponiendo una presión fija) y sin sobrecalentamiento. La “temperatura o punto de solidificación”, se puede definir como la temperatura a la cual se termina la solidificación de un material.

8-7

Estructura de la pieza colada

En la fabricación de componentes por el proceso de fundición o vaciado, los metales fundidos se vierten en moldes y se dejan solidificar. El molde produce una forma final llamada **pieza vaciada o colada**. En otros procesos, el molde produce una forma simple, llamada **lingote**. Un lingote suele requerir extensa deformación plástica para formar un producto terminado. Una **macroestructura**, que a veces se llama **estructura de lingote**, consiste hasta en tres partes (Fig. 8-13). (Recuérdese que en los capítulos 1 y 2 usamos el término “macroestructura” para describir la estructura de un material a una escala macroscópica. Por consiguiente, el término “estructura de lingote” sería el más adecuado.)

Zona de enfriamiento rápido La **zona de enfriamiento rápido** es una banda angosta de granos de orientación aleatoria en la superficie de la pieza. El metal en la pared del molde es el primero que llega a la temperatura de solidificación. Además, la pared del molde proporciona muchas superficies en las cuales tiene lugar la nucleación heterogénea.

Zona columnar La **zona columnar** contiene granos alargados orientados en determinada dirección cristalográfica. Al eliminarse el calor de la pieza por el material del molde, los granos en la zona de enfriamiento rápido crecen en dirección contraria al flujo del calor, es decir, desde las zonas más frías hacia las más calientes de la pieza. Esta tendencia suele traducirse en que los granos crecen perpendiculares a la pared del molde.

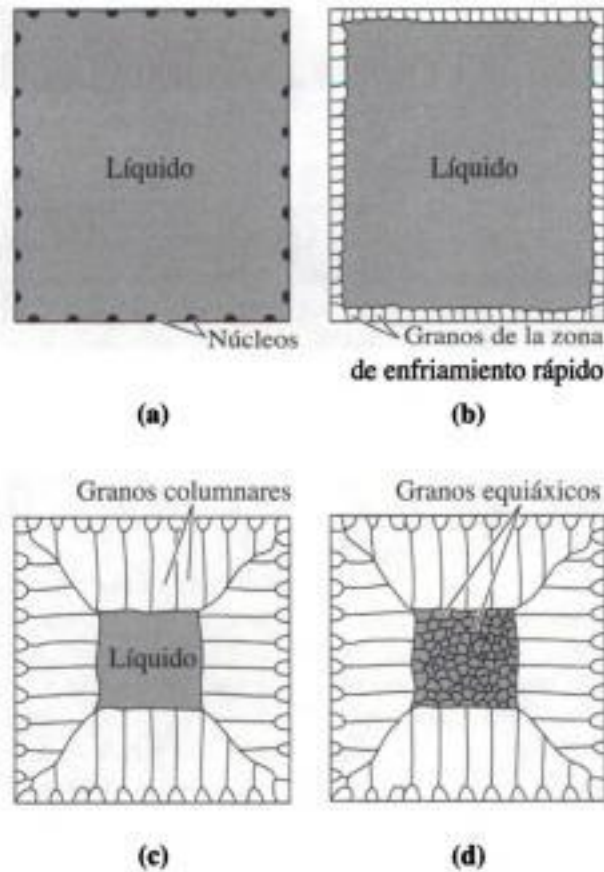


Figura 8-13
Desarrollo de la estructura de lingote en una pieza colada, durante la solidificación: (a) comienza la nucleación, (b) se forma la zona de enfriamiento rápido, (c) el crecimiento preferencial produce la zona columnar y (d) con más nucleación se forma la zona equiaxica.

Los granos crecen con más rapidez en ciertas direcciones cristalográficas. En metales con estructura cristalina cúbica, los granos de la zona de enfriamiento rápido que tengan una dirección $\langle 100 \rangle$ perpendicular a la pared del molde crecen con más rapidez que los granos con orientaciones menos favorables (Fig. 8-14). Al final, los granos de la zona columnar tienen direcciones $\langle 100 \rangle$ que son paralelas entre sí, que proporcionan propiedades anisotrópicas a esta zona. La formación de la zona columnar está determinada principalmente por los fenómenos

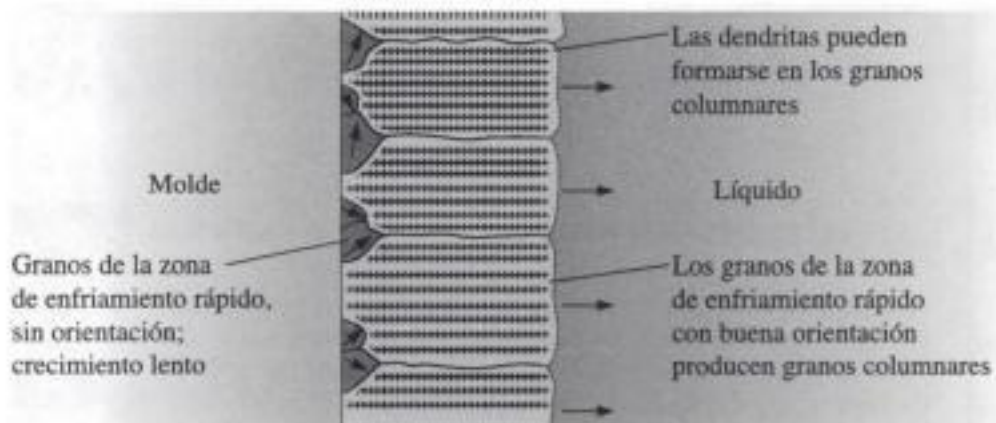


Figura 8-14 El crecimiento competitivo de los granos en la zona de enfriamiento rápido hace que sólo los granos que tengan orientaciones favorables formen granos columnares.

de crecimiento y no por los de nucleación. Los granos pueden estar formados por muchas dendritas, si el líquido estaba subenfriado. Si no hay subenfriamiento, la solidificación puede avanzar por crecimiento plano de los granos columnares.

Zona equiáxica Aunque el sólido puede continuar creciendo en forma columnar hasta que se solidifique todo el líquido, frecuentemente se forma una zona equiáxica en el centro de la pieza colada o lingote. La **zona equiáxica**, contiene nuevos granos orientados al azar, frecuentemente a causa de una baja temperatura de vaciado, de la presencia de elementos de aleación, o agentes para refinamiento de grano o inoculantes. Los granos pequeños o las dendritas en la zona de enfriamiento rápido también pueden disgregarse o seccionarse debido a fuertes corrientes de convección que se establecen a medida que comienza a solidificar la pieza.[8] Estas dendritas seccionadas también pueden ser sitios de nucleación heterogénea en donde al final serán los granos equiáxicos. Estos granos crecen en forma relativamente redonda o equiáxica, con orientación aleatoria, y detienen el crecimiento de los granos columnares. La formación de la zona equiáxica es un proceso controlado por nucleación y hace que esa parte de la pieza muestre comportamiento isotrópico.

Al comprender los factores que influyen sobre la solidificación en distintas regiones, es posible producir piezas coladas que formen primero una “piel” o “cáscara” de zona de enfriamiento rápido, y después dendritas. Los metales y las aleaciones que muestran esta macroestructura se llaman **aleaciones formadoras de piel**. También se puede controlar la solidificación de tal modo que no se puedan ver piel ni arreglos de granos dendríticos que avancen; el cambio de zona columnar a equiáxica queda casi en las paredes del molde. El resultado es una pieza colada cuya macroestructura consiste en granos predominantemente equiáxicos. Los metales y las aleaciones que solidifican de este modo se llaman **aleaciones pastosas**, ya que el material colado parece como una pasta de granos de sólido que flotan en un fundido líquido. Muchas aleaciones de aluminio y de magnesio tienen esta clase de solidificación.[8] Frecuentemente se trata de generar una estructura equiáxica total para obtener así una pieza con propiedades isotrópicas, mediante una buena refinación de grano o inoculación. En una sección posterior, examinaremos un caso (álabes de turbina) donde controlamos la solidificación para generar granos totalmente columnares y, por consiguiente, un comportamiento anisotrópico.

La estructura y la microestructura de colada o vaciado tienen particular importancia para los componentes que se vacían en forma directa a su forma final. Sin embargo, en muchos casos, como se describió en la sección 8-1, primero se vacían los metales y las aleaciones en lingotes, y después los lingotes se someten a procesamiento termomecánico (por ejemplo, laminación, forjado, etc.). Durante esos pasos, la macroestructura de colada se destruye y se formará una nueva microestructura, dependiendo del proceso termomecánico que se use (capítulo 7).

8-8 Defectos de solidificación

Aunque son muchos los defectos que potencialmente se pueden generar durante la solidificación, la contracción y la porosidad merecen mención especial. Si una pieza vaciada contiene poros (agujeros pequeños), esa pieza puede fallar catastróficamente si se usa en aplicaciones de carga (por ejemplo, aspas de turbina).

Contracción Casi todos los materiales son más densos en estado sólido que en estado líquido. Durante la solidificación, el material se contrae o encoge hasta un 7% (tabla 8-2).

TABLA 8-2 ■ Contracción durante la solidificación de algunos materiales

Material	Contracción (%)
Al	7.0
Cu	5.1
Mg	4.0
Zn	3.7
Fe	3.4
Pb	2.7
Ga	+3.2 (dilatación)
H ₂ O	+8.3 (dilatación)
Acero al bajo carbono	2.5–3.0
Acero al alto carbono	4.0
Fundición blanca	4.0–5.5
Fundición gris	+1.9 (dilatación)

Nota: Algunos datos de la Ref. [9]

Frecuentemente, la mayor parte de la **contracción** produce **cavidades**, si la solidificación comienza en todas las superficies de la pieza, o **rechupes**, si una superficie se solidifica con más lentitud que las demás (Fig. 8-15). La presencia de esos rechupes puede ocasionar problemas. Por ejemplo, si en la producción de lingotes de zinc queda un rechupe, se puede condensar vapor de agua en él. Esa agua puede producir una explosión si el lingote se introduce en un horno en el que se funde el zinc, por ejemplo, para aplicaciones de galvanizado por inmersión en caliente.

Una técnica común para controlar las **cavidades** y los **rechupes** es poner una **mazarota**, que es un depósito adicional de metal, adyacente y comunicado con la pieza vaciada. Al solidificarse la pieza y contraerse, el metal líquido pasa de la mazarota a la pieza para ocupar el hueco de contracción. Sólo debemos asegurarnos de que la mazarota se solidifique después de la pieza; y de que exista un canal interno de líquido que conecte al líquido de la mazarota con el último líquido en solidificarse en la pieza. Se puede aplicar la regla de Chvorinov para diseñar el tamaño de la mazarota. El siguiente ejemplo ilustra cómo se pueden diseñar las mazarotas para compensar la contracción.

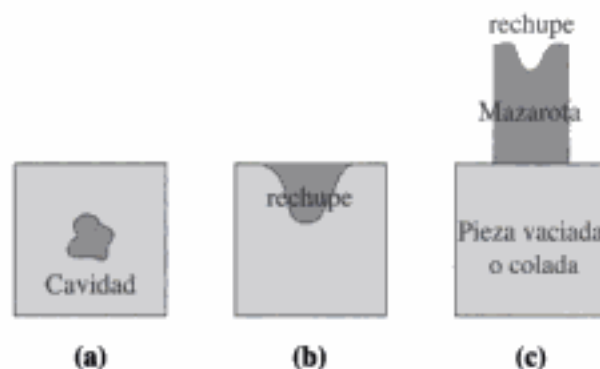


Figura 8-15
Pueden presentarse varias clases de macrocontracción, que incluyen cavidades y rechupes. Para ayudar a compensar la contracción se pueden usar mazarotas.

EJEMPLO 8-6**Diseño de una mazarota para una pieza vaciada**

Diseñe una mazarota cilíndrica, con altura igual al doble de su diámetro, que compense la contracción de una pieza de $2 \times 8 \times 16$ cm (Fig. 8-16)

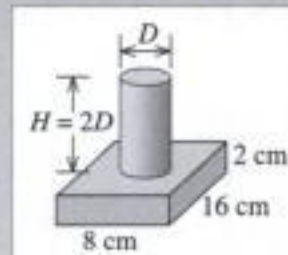


Figura 8-16

Geometría de la pieza y la mazarota (para el ejemplo 8-6)

SOLUCIÓN

Sabemos que la mazarota debe enfriarse después que la pieza. Sin embargo, para ser prudentes, normalmente requerimos que la mazarota dure 25% más de tiempo en solidificarse que la pieza. Por consiguiente:

$$t_{\text{mazarota}} = 1.25 t_{\text{pieza}}, \text{ es decir } B \left(\frac{V}{A} \right)_r^2 = 1.25 B \left(\frac{V}{A} \right)_c^2$$

Los subíndices r y c indican mazarota y pieza, respectivamente.

La constante de molde B es igual para la mazarota y la pieza, así que:

$$\left(\frac{V}{A} \right)_r = \sqrt{1.25 \left(\frac{V}{A} \right)_c}$$

$$V_c = (2)(8)(16) = 256 \text{ cm}^3$$

$$A_c = (2)(2)(8) + (2)(2)(16) + (2)(8)(16) = 352 \text{ cm}^2$$

Podemos plantear las ecuaciones del volumen y el área de una mazarota cilíndrica, observando que $H = 2D$:

$$V_r = (\pi/4)D^2H = (\pi/4)D^2(2D) = (\pi/2)D^3$$

$$A_r = 2(\pi/4)D^2 + \pi DH = 2(\pi/4)D^2 + \pi D(2D) = (5\pi/2)D^2$$

$$\frac{V_r}{A_r} = \frac{(\pi/2)(D)^3}{(5\pi/2)(D)^2} = \frac{D}{5} > \sqrt{\frac{(1.25)(256)}{352}}$$

$$D = 4.77 \text{ cm} \quad H = 2D = 9.54 \text{ cm} \quad V_r = 170.5 \text{ cm}^3$$

Aunque el volumen de la mazarota es menor que el de la pieza, la mazarota se solidifica con más lentitud debido a su forma compacta.

Contracción interdendrítica Consiste en pequeños poros de contracción entre dendritas (Fig. 8-17). Este defecto, también llamado **microporosidad**, es difícil de evitar usando mazarotas. Las altas velocidades de enfriamiento pueden reducir los problemas de contracción interdendrítica; las dendritas pueden ser más cortas, lo que permitirá que el líquido pase a través de la red de dendritas hacia la interfaz que se está solidificando. Además, cualquier contracción remanente puede ser más fina y estar distribuida más uniformemente.

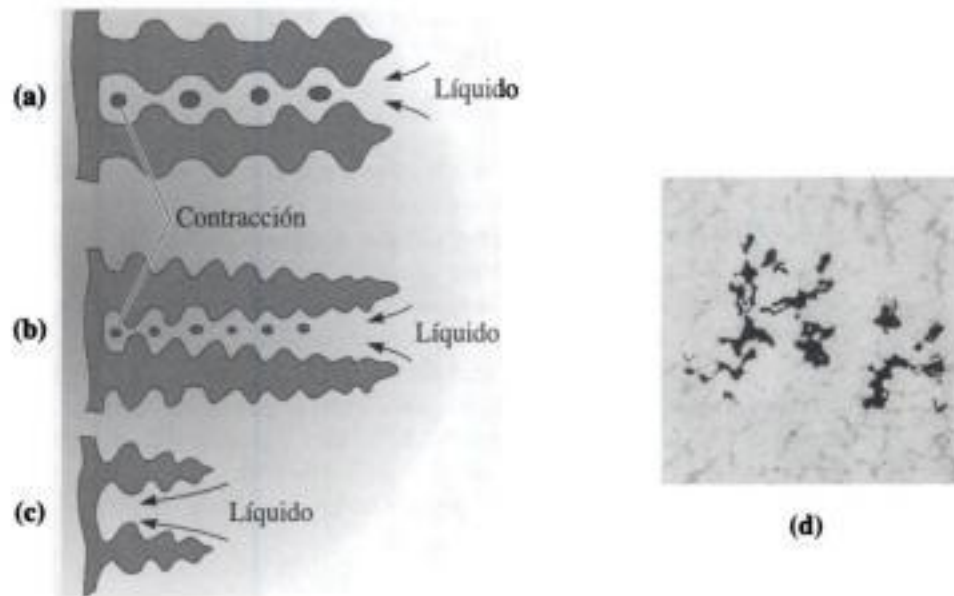


Figura 8-17 (a) Puede haber contracción entre los brazos dendríticos. (b) Con pequeñas distancias entre brazos dendríticos secundarios, se obtiene una porosidad menor y distribuida con más uniformidad. (c) Unos brazos dendríticos cortos pueden ayudar a evitar la contracción. (d) Se muestra la contracción interdendrítica en una aleación de aluminio (80×).

Sopladuras o Porosidad de gas Muchos metales disuelven una gran cantidad de gas cuando están fundidos. Por ejemplo, el aluminio disuelve al hidrógeno. Sin embargo, al solidificarse el aluminio el metal sólido sólo retiene una fracción pequeña del hidrógeno en su estructura cristalina, porque la solubilidad es apreciablemente menor (Fig. 8-18). El exceso de hidrógeno que no puede incorporarse en la estructura cristalina del metal o la aleación sólida forma burbujas que pueden quedar atrapadas en el metal sólido, produciendo

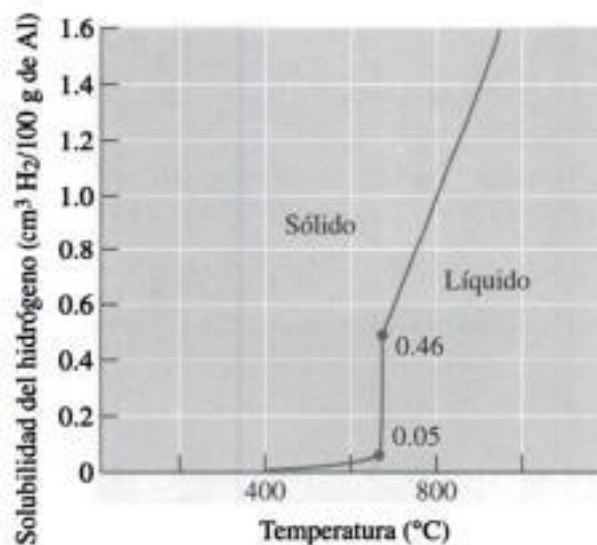


Figura 8-18 Solubilidad del hidrógeno gaseoso en el aluminio, cuando la presión parcial de $H_2 = 1$ atm.

porosidades de gas o sopladuras. La cantidad de gas que se puede disolver en el metal fundido se determina con la **ley de Sievert**:

$$\% \text{ de gas} = K \sqrt{p_{\text{gas}}} \quad (8-7)$$

donde p_{gas} es la presión parcial del gas en contacto con el metal, y K es una constante que, para determinado sistema de metal y gas, aumenta al aumentar la temperatura. Se pueden minimizar las sopladuras en las piezas coladas manteniendo baja la temperatura del líquido o agregando al líquido materiales que se combinen con el gas y formen un sólido, o asegurando que la presión parcial del gas se mantenga baja. Esto último puede lograrse colocando al metal fundido en una cámara de vacío o burbujeando un gas inerte a través del metal. Como p_{gas} es baja en el vacío, el gas deja el metal, pasa al vacío y es succionado y eliminado. El **lavado con gas o burbujeo**, es un proceso en el que se inyectan burbujas de un gas, que puede ser inerte o reactivo, en un metal fundido, para eliminar elementos indeseables en él. Por ejemplo, el hidrógeno del aluminio se puede eliminar con nitrógeno o con cloro. En el siguiente ejemplo se ilustra cómo diseñar un proceso de desgasificación.

EJEMPLO 8-7

Diseño de un proceso de desgasificación para el cobre

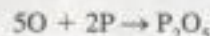
Después de fundirlo a presión atmosférica, el cobre contiene 0.01% en peso de oxígeno. Para asegurar que las piezas coladas no contengan sopladuras, se desea reducir el porcentaje de peso debajo de 0.00001% antes del vaciado. Diseñe un proceso de desgasificación para el cobre.

SOLUCIÓN

Este problema se puede resolver de distintas formas. En una de ellas, el cobre líquido se coloca en una cámara de vacío; el oxígeno se elimina del líquido y se arrastra en el vacío. El vacío necesario se puede estimar con la ley de Sievert:

$$\begin{aligned} \frac{\%O_{\text{inicial}}}{\%O_{\text{vacío}}} &= \frac{K\sqrt{p_{\text{inicial}}}}{K\sqrt{p_{\text{vacío}}}} = \sqrt{\left(\frac{1 \text{ atm.}}{p_{\text{vacío}}}\right)} \\ \frac{0.01\%}{0.00001\%} &= \sqrt{\left(\frac{1}{p_{\text{vacío}}}\right)} \\ \frac{1 \text{ atm.}}{p_{\text{vacío}}} &= (1000)^2 \quad \text{o} \quad p_{\text{vacío}} = 10^{-6} \text{ atm.} \end{aligned}$$

Otro método sería introducir una aleación de cobre con 15% de fósforo. El fósforo reacciona con el oxígeno y forma P_2O_5 , que flota y se separa del líquido:



Normalmente, se debe agregar entre 0.01% y 0.02% de P para eliminar el oxígeno.

En la producción del **acero inoxidable**, se usa un proceso llamado **descarburización con argón y oxígeno** (AOD, *argon oxygen decarburization*) para bajar el contenido de carbono en el fundido sin oxidar al cromo o al níquel. En este proceso se hace pasar una mezcla de argón

(o nitrógeno) y oxígeno gaseosos en el acero inoxidable fundido. El carbono disuelto en ese acero se oxida con el oxígeno por formación de monóxido de carbono (CO) gaseoso. El CO es arrastrado por las burbujas inertes de argón (o de nitrógeno). Estos procesos necesitan un control muy cuidadoso, porque algunas reacciones (por ejemplo, la oxidación del carbono a CO) son exotérmicas (generan calor). Por ejemplo, lo que se persigue en el proceso AOD es eliminar el carbono sin oxidar al cromo ni al níquel, que son los elementos aleantes en el acero inoxidable.

8-9

Procesos de vaciado para fabricar componentes

La figura 8-19 resume cuatro de las varias docenas de procesos comerciales de vaciado. En algunos procesos se puede usar el mismo molde; en otros, el molde es desechable. Los procesos de **vaciado en arena** incluyen el moldeado en arena verde, en los que granos de arena de sílice (SiO_2) aglomerados con arcilla húmeda se compactan en torno a un modelo removible. En los procesos de vaciado en cerámica se usa un material cerámico de grano fino para el molde; se puede colar un lodo de la cerámica en torno a un modelo reusable, que se retira después de que endurece la cerámica. En el **vaciado a la cera perdida o en modelo perdido**, el lodo de un material cerámico como sílice coloidal (formado por partículas cerámicas de nanotamaño) recubre un modelo de cera. Después de solidificar la cerámica (es decir, los geles de dispersión de sílice), se funde la cera y se vacía de la cáscara de cerámica, dejando una cavidad que se llena con el metal fundido. Este **proceso a la cera perdida**, es bastante adecuado para generar formas muy intrincadas. Los dentistas y los joyeros usaron, originalmente, el proceso preciso de colado de inversión. En la actualidad, con este proceso se producen componentes como álabes de turbina, cabezas de palos de golf de titanio y prótesis para rodillas y caderas. En otro proceso, llamado **proceso a la espuma perdida**, se usan perlas de poliestireno, parecidas a las que se usan para fabricar vasos para café o materiales para empaque, y se produce un modelo de espuma. En torno al modelo se compacta arena suelta para producir el molde. Cuando se vierte el metal fundido en el molde, se funde y el molde de espuma de polímero se descompone y el metal ocupa el lugar del modelo. La figura 8-20 muestra un monobloque de motor producido con perlas de poliestireno desechables.

En los procesos de vaciado a presión con molde permanente, se maquina una cavidad en un material metálico. Después de que solidifica el metal vaciado en la cavidad, se abre el molde, la pieza se saca y el molde se vuelve a usar. El proceso en el que se usan moldes metálicos tiende a proporcionar las piezas de máxima resistencia, debido a la solidificación rápida. Los moldes de cerámica, incluyendo los que se usan en la cera perdida, son buenos aislantes y producen las piezas con enfriamiento más lento y de menor resistencia. Millones de pistones para motor de camión y automóvil se fabrican en fundidoras con el vaciado en molde permanente.[9] Las ventajas del **vaciado en molde permanente** son un buen acabado superficial y buena exactitud dimensional. Los altos costos de los moldes y la reducida complejidad de la forma son las limitaciones de esta técnica.

En el **vaciado a presión**, el material metálico fundido se hace pasar al molde bajo grandes presiones, y la presión se mantiene durante la solidificación. Muchas aleaciones de zinc, aluminio y magnesio se procesan con vaciado a presión. Las ventajas del proceso de vaciado a presión son los acabados superficiales extremadamente lisos, una muy buena exactitud dimensional, la capacidad de colar formas complicadas y las grandes capacidades de producción. Como el molde es metálico y debe resistir altas presiones, las matrices que se usan son costosas y la técnica se limita a componentes de tamaño pequeño.

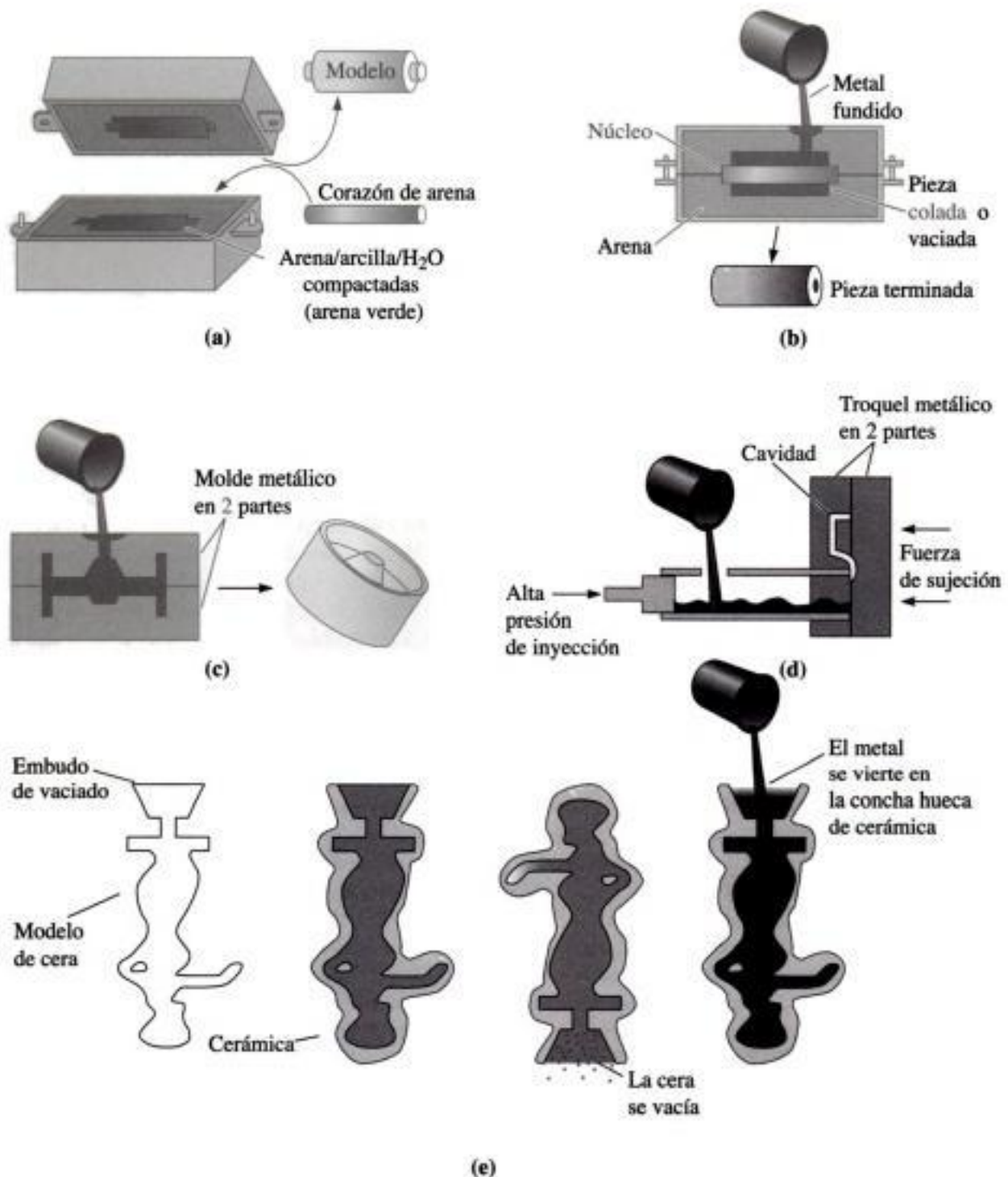


Figura 8-19 Cuatro procesos normales de vaciado: (a) y (b) moldeo con arena verde, en donde se comprime arena aglomerada con arcilla en torno a un modelo. Con los corazones de arena se pueden obtener cavidades internas en la pieza. (c) Proceso de molde permanente, en el que se vacía el metal en un molde de hierro o acero. (d) Colado a presión, en el cual el metal se inyecta a alta presión en una matriz de acero. (e) Vaciado al modelo perdido, en el que se rodea con cerámica a un modelo de cera; después de que se funde y vacía la cera, el metal se vierte en el molde.

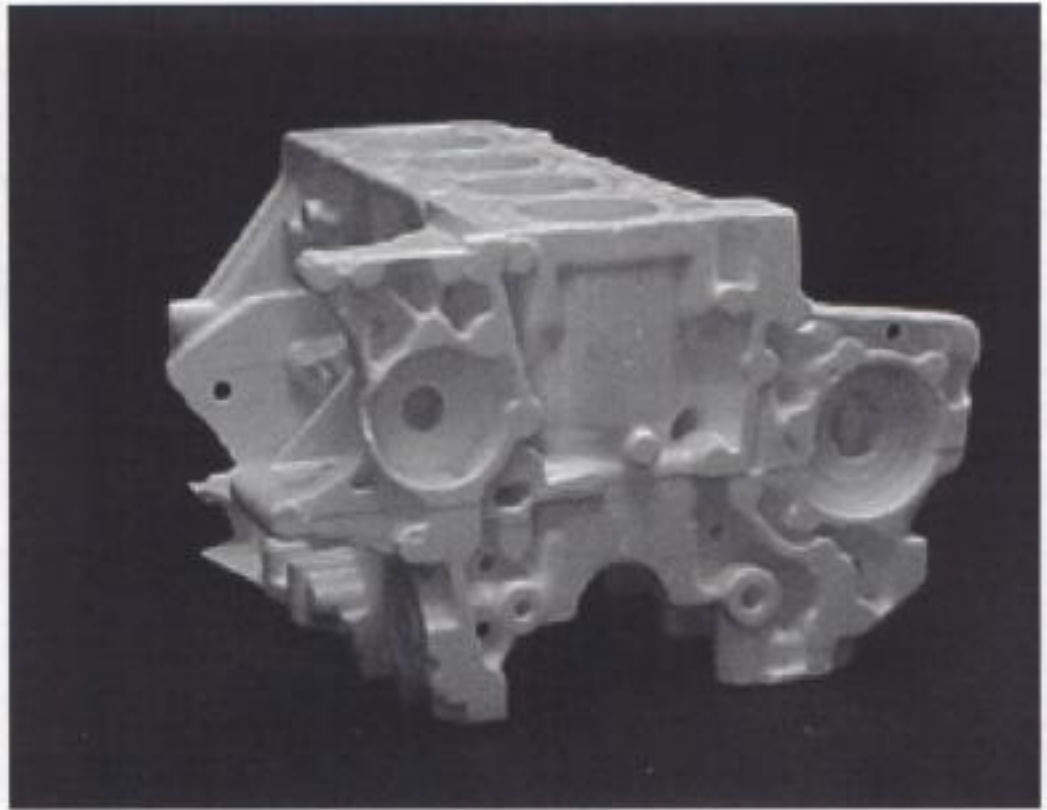


Figura 8-20 Monobloque de motor producido con el proceso de colado a la espuma perdida. (Cortesía de Paul Arch, Nova Chemicals.)

8-10 Colada continua y vaciado de lingotes

Como se describió en la sección anterior, el vaciado es un medio que se usa en la fabricación de componentes. También es un proceso para producir lingotes que se pueden seguir procesando para obtener diversas formas, como barras, varillas, alambres, etc. En la industria del acero, se producen millones de libras de aceros en los altos hornos, hornos de arco eléctrico y otros procesos. La figura 8-21 muestra un resumen de los pasos que intervienen en la producción de los aceros a partir de minerales de hierro, coque y caliza. Aunque varían los detalles, la mayoría de los metales y las aleaciones (por ejemplo, cobre y zinc) se obtienen a partir de sus minerales con procesos parecidos. Algunos metales, como el aluminio, se producen con procesos electrolíticos, ya que el óxido de aluminio es demasiado estable y no se puede reducir a aluminio metálico usando carbono u otros agentes reductores.

En muchos casos, se comienza con chatarra de metal y aleaciones reciclables. En ellos, el metal de la chatarra se funde y procesa, eliminando las impurezas y ajustando la composición. Cada año se reciclan cantidades considerables de aceros, aluminio, zinc, aceros inoxidables, titanio y muchos otros materiales.

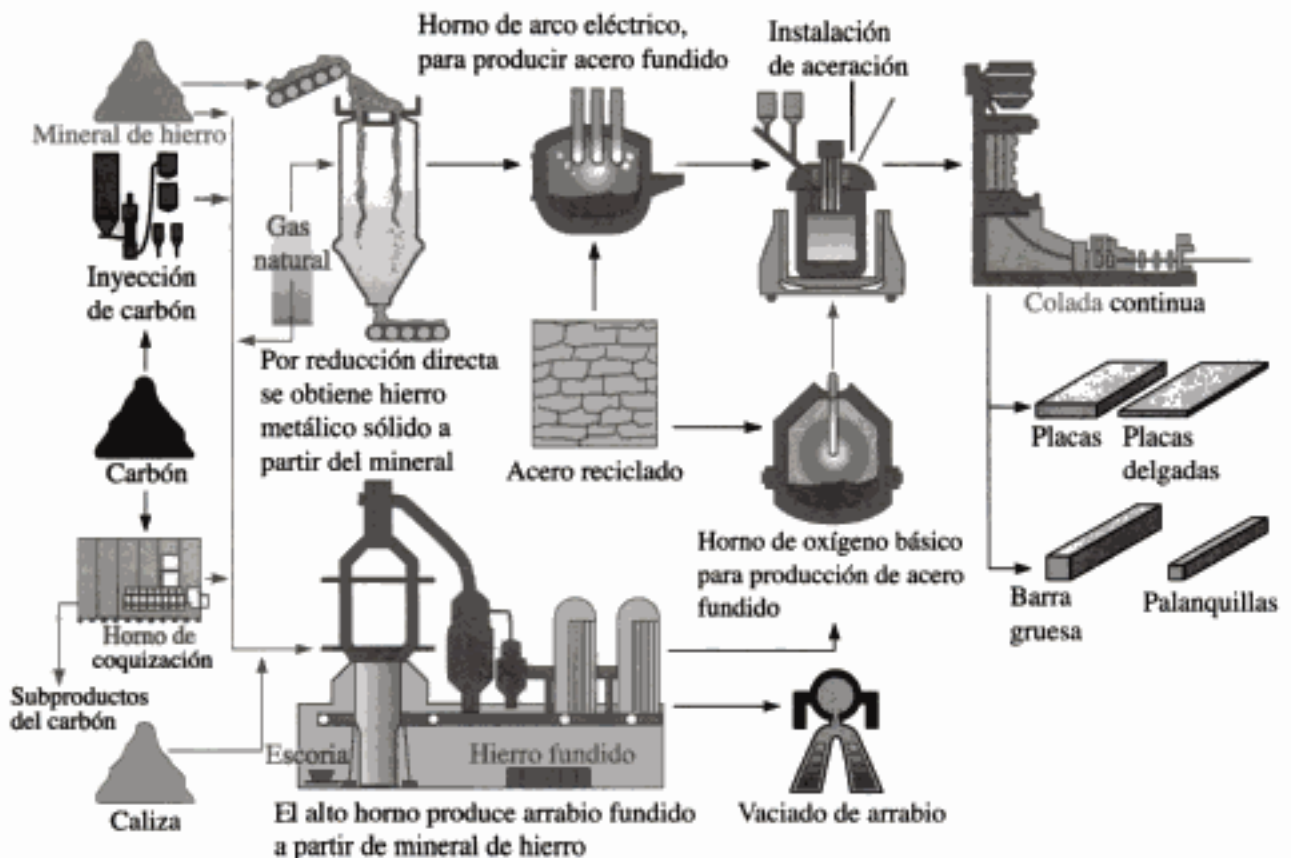


Figura 8-21 Resumen de las etapas de producción de aceros a partir de mineral de hierro, coque y caliza. (Fuente: www.steel.org. Se usa con autorización del American Iron and Steel Institute.)

En el **vaciado de lingotes**, los aceros o las aleaciones fundidas que se obtienen en un horno se vacían en moldes grandes. Las piezas que se obtienen se llaman lingotes y se procesan después para convertirlos en formas útiles mediante procesamiento termomecánico, frecuentemente en otro lugar. En el proceso de **colada continua**, la idea es pasar desde un material metálico fundido hasta alguna forma más útil, o "semiterminada", como por ejemplo, una placa, una palanquilla, etc. La figura 8-22 muestra un método frecuente para producir placas y barras de acero. El metal líquido se alimenta de un recipiente de retención (una artesa de colada), pasa a un molde oscilante de cobre, enfriado con agua, que enfría rápidamente la superficie del acero. El acero parcialmente solidificado se saca del molde con la misma rapidez con la que entra más acero. El centro de la pieza colada de acero termina por solidificarse bastante después de salir del molde. A continuación el material continuamente vaciado se corta en longitudes adecuadas, con máquinas especiales.

La colada continua es económica para procesar muchos aceros, aceros inoxidables y aluminio. También es económico el vaciado en lingotes, y se usa con muchos aceros cuando no se dispone de una máquina de colada continua, o donde la capacidad es reducida, así como para aleaciones de metales no ferrosos (como el zinc y el cobre), donde los volúmenes son relativamente pequeños y el costo del capital necesario para la máquina de colada continua no se pueda justificar. Además, no todas las aleaciones se pueden colar con el proceso continuo.

Los pasos de procesamiento secundario en la manufactura de aceros y otras aleaciones se muestran en la figura 8-23.

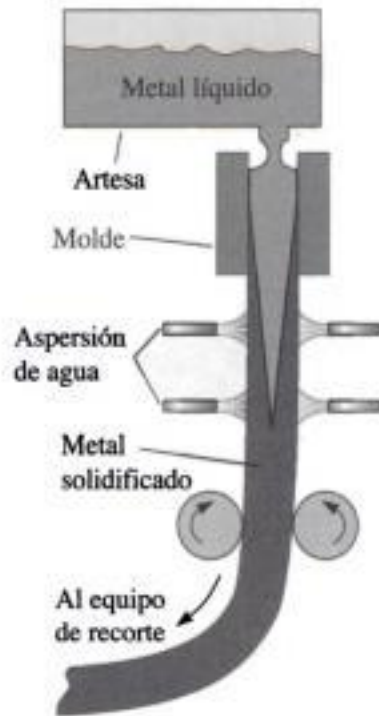


Figura 8-22

Colada continua vertical, la cual se usa para fabricar muchos productos de acero. El metal líquido contenido en la artesa se solidifica parcialmente en un molde.

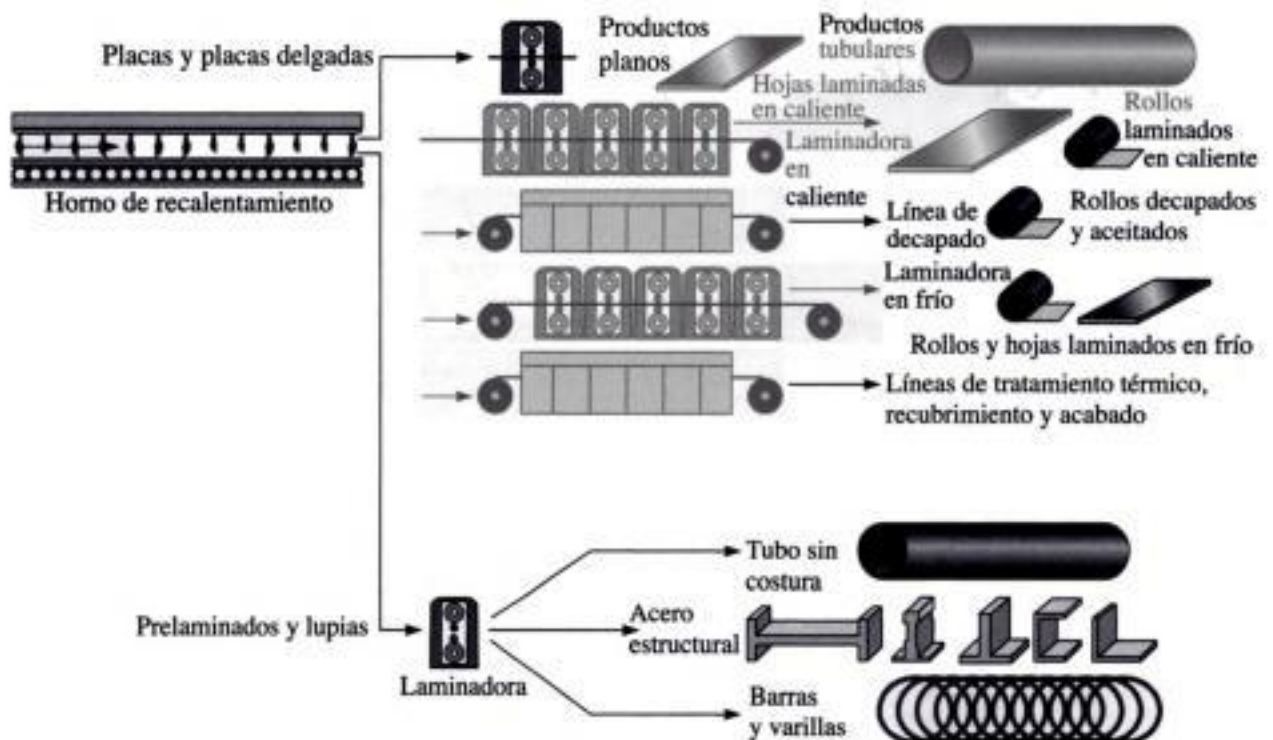


Figura 8-23 Pasos de procesamiento secundario en la fabricación de acero y aleaciones. (Fuente: www.steel.org. Se reproduce con autorización de American Iron and Steel Institute.)

EJEMPLO 8-8**Diseño de una máquina de colada continua**

La figura 8-24 muestra un método para colado continuo de placa de aluminio de 0.25 pulg de espesor y 48 pulg de ancho, que después se va a laminar para obtener hoja de aluminio. El aluminio líquido se introduce entre dos grandes rodillos de acero que giran lentamente. Se desea que el aluminio se solidifique por completo, por la acción de los rodillos, en el momento en que sale la placa de la máquina. Los rodillos funcionan como molde permanente, con una constante B de molde, de aproximadamente de 5 min/pulg² cuando el aluminio se vierte con el sobrecalentamiento adecuado. Diseñe los rodillos que se requieren para este proceso.

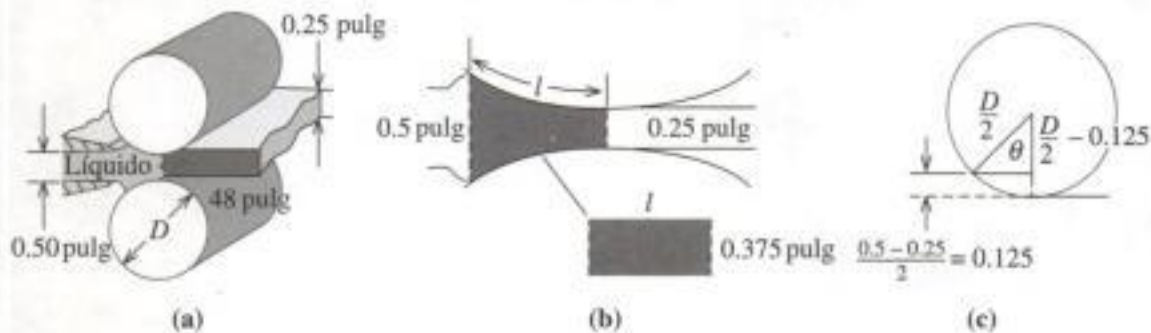


Figura 8-24 Colado continuo horizontal del aluminio (para el ejemplo 8-8).

SOLUCIÓN

Sería mejor simplificar la geometría, para poder determinar un tiempo de solidificación en el colado. Supongamos que el área sombreada de la figura 8-24(b) representa la pieza, y que se puede aproximar con el espesor promedio por una longitud y un ancho. El espesor promedio es $(0.50 \text{ pulg} + 0.25 \text{ pulg})/2 = 0.375 \text{ pulg}$. Entonces:

$$V = (\text{espesor}) (\text{longitud}) (\text{ancho}) = 0.375lw$$

$$A = 2(\text{longitud}) (\text{ancho}) = 2lw$$

$$\frac{V}{A} = \frac{0.375lw}{2lw} = 0.1875 \text{ pulg}$$

Sólo el área que está en contacto directo con los rodillos se usa en la regla de Chvorinov, porque casi no se transfiere calor de otras superficies. El tiempo de solidificación debe ser:

$$t_s = B \left(\frac{V}{A} \right)^2 = (5)(0.1875)^2 = 0.175 \text{ min}$$

Para que la placa permanezca en contacto con los rodillos durante este tiempo, se deben diseñar el diámetro de los rodillos y la rapidez de rotación de los mismos. La figura 8-24(c) muestra que el ángulo θ entre los puntos de entrada y salida del líquido de los rodillos es:

$$\cos \theta = \frac{(D/2) - 0.125}{(D/2)} = \frac{D - 0.25}{D}$$

La velocidad superficial de los rodillos es el producto de su circunferencia por su velocidad de rotación, $v = \pi DR$, donde R está en revoluciones/minuto. La velocidad v

también es la rapidez con que se puede producir la placa de aluminio. El tiempo necesario para que los rodillos avancen la distancia l debe ser igual al tiempo de solidificación.

$$t = \frac{l}{v} = 0.175 \text{ min}$$

La longitud l es la fracción de la superficie del rodillo que está en contacto con el aluminio durante su congelamiento, y se calcula con

$$l = \frac{\pi D \theta}{360}$$

Entonces, sustituyendo l y v en la ecuación para el tiempo:

$$t = \frac{l}{v} = \frac{\pi D \theta}{360 \pi D R} = \frac{\theta}{360 R} = 0.175 \text{ min}$$

$$R = \frac{\theta}{(360)(0.175)} = 0.0159 \theta \text{ rev/min}$$

Hay varias combinaciones de D y R que producen la rapidez necesaria de solidificación. Se calculará θ para varios diámetros, para después determinar el R necesario.

D	θ	l	$R = 0.0159 \theta$	$v = \pi D R$
24 pulg	8.2771	1.7334 pulg	0.1316 rev/min	9.923 pulg/min
36 pulg	6.7560	2.1230 pulg	0.1074 rev/min	12.149 pulg/min
48 pulg	5.8502	2.4505 pulg	0.0930 rev/min	14.027 pulg/min
60 pulg	5.2322	2.7396 pulg	0.0832 rev/min	15.683 pulg/min

Al aumentar el diámetro de los rodillos, aumenta el área de contacto (l) entre ellos y el metal. Esto, a su vez, permite una mayor velocidad superficial (v) de los rodillos y aumenta la capacidad de producción de la placa. Sin embargo, los rodillos de mayor diámetro no necesitan girar con tanta rapidez para alcanzar esas velocidades mayores.

Para seleccionar el diseño final, preferimos usar el mayor diámetro práctico de rodillo, para asegurar grandes capacidades de producción. Sin embargo, a medida que los rodillos se vuelven más voluminosos, éstos y su equipo de soporte se vuelven más costosos.

En la operación real de esa máquina de colada continua, se podrían usar mayores velocidades, porque la placa no debe haberse solidificado por completo en el punto en el que sale de los rodillos.

8-11 Solidificación direccional [DS], crecimiento de monocristales y crecimiento epitaxial

Hay algunas aplicaciones en las que no es deseable una estructura granular pequeña y equiaxial o equidimensional. Las piezas coladas que se usan para los álabes y los deflectores de los motores de turbina son un ejemplo (Fig. 8-25). Estas piezas se fabrican frecuentemente con superaleaciones a base de titanio, cobalto o níquel, usando vaciado de modelo perdido de precisión.

En piezas vaciadas convencionales frecuentemente se producen estructuras granulares equiaxiales. Sin embargo, los álabes y los deflectores para los motores de turbina y de jet fallan a lo largo de los límites de grano transversales.

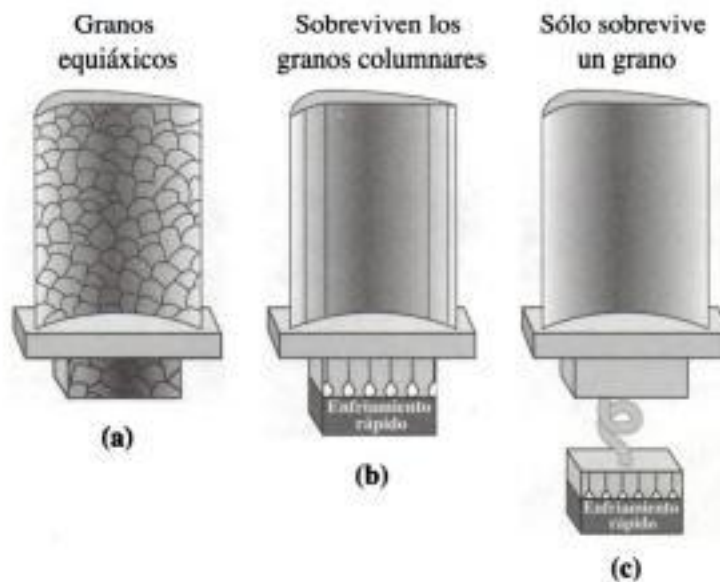


Figura 8-25 Control de la estructura granular en los álabes de turbina: (a) granos convencionales equiaxiales, (b) granos columnares solidificados direccionalmente y (c) monocristal.

Se obtienen mejores resistencias a la termofluencia y a la fractura con la técnica de crecimiento por **solidificación direccional** (DS, *directional solidification*). En este proceso, el molde se calienta en un extremo y se enfría en el otro, para producir una microestructura columnar, con todos los límites de grano en la dirección longitudinal de la parte. No hay límites de grano en la dirección transversal [Fig. 8-25(b)].

Se obtienen propiedades todavía mejores aplicando la técnica de **monocristal** (SC, *single crystal*). La solidificación de los granos columnares se inicia de nuevo en una superficie fría; sin embargo, debido a la conexión helicoidal, sólo puede crecer un solo grano hacia el cuerpo principal de la pieza [Fig. 8-25(c)]. La pieza monocristalina no tiene límites de grano, por lo que sus planos y direcciones cristalográficas pueden producirse con una orientación óptima.

Crecimiento de monocristales Una de las aplicaciones más importantes de la solidificación es el crecimiento de monocristales. Los materiales policristalinos no se pueden usar adecuadamente en muchas aplicaciones electrónicas y ópticas. Los límites de grano y demás defectos interfieren con los mecanismos que permiten tener buenas propiedades eléctricas u ópticas. Por ejemplo, para aprovechar el comportamiento semiconductor del silicio dopado, se deben usar monocristales de alta pureza. La tecnología actual del silicio usa monocristales grandes (hasta de 10 pulgadas de diámetro). Normalmente, un cristal grande se hace crecer del material [Fig. 8-26(a)]. A continuación, el cristal grande se corta formando obleas de silicio, de pocos milímetros de grueso [Fig. 8-26(b)]. Algunos de los procesos más frecuentes para crecer monocristales de silicio, de GaAs, niobato de litio (LiNbO_3) y muchos otros materiales, son el de **Bridgman** y el de **Czochralski**. La figura 8-26(c) muestra el proceso de Bridgman.

Los hornos de crecimiento de cristales que contienen los materiales fundidos se deben mantener a una temperatura precisa y estable. Frecuentemente se usa como "semilla" un cristal pequeño, con orientación cristalográfica predeterminada. Se controla la transferencia de calor, para que todo el material fundido cristalice en un monocristal. Normalmente, los monocristales tienen propiedades muy mejoradas, controlables y predecibles. Aunque su costo suele ser mayor que el de los materiales policristalinos. Sin embargo, con la mayor demanda, el costo de los monocristales podría no ser un factor de importancia, en comparación con el resto de los costos de procesamiento que intervienen en la fabricación de artículos novedosos y útiles.



(a)



(b)



(c)

Figura 8-26 (a) Monocristal de silicio, (b) oblea de silicio y (c) técnica de Bridgman. (Cortesía de PhotoDisc/Getty Images.)

Crecimiento epitáxico Es posible que haya más de cien procesos para depositar materiales en películas delgadas. En algunos de ellos se necesita controlar la textura o la orientación cristalográfica del material policristalino que se deposita; en otros, se requiere una película de monocristal, orientada en determinada dirección. En este caso, se puede usar un sustrato con orientación conocida. Si la coincidencia cristalina entre el sustrato y la película es buena (de una diferencia porcentual pequeña), es posible hacer crecer películas delgadas altamente orientadas o de monocristal. A este proceso se le llama **crecimiento epitáxico**. La palabra *epitaxia*

o *epitaxis* proviene de dos palabras griegas: *epi* (por arriba, por abajo, alrededor) y *taxis* (ordenado).[10] Cuando se hacen crecer películas delgadas de un material (por ejemplo, Si dopado con fósforo (P) sobre el sustrato del mismo material (silicio (Si)), el proceso se llama **homoeptitaxia**. Cuando se hacen crecer películas delgadas policristalinas muy orientadas o de monocristal sobre otro material que proporciona sitios de nucleación heterogénea, el proceso se llama **heteroeptitaxia**. Mediante procesos epitáxicos en fase líquida y vapor, se pueden hacer crecer muchos dispositivos de semiconductores compuestos.[11] No siempre se requiere la solidificación en el crecimiento epitáxico. De igual manera, se pueden hacer crecer muchos materiales en forma muy orientada (es decir, con textura cristalográfica apreciable) sobre sustratos amorfos; por ejemplo, ZnO sobre vidrio.

8-12 Solidificación de polímeros y vidrios inorgánicos

En forma parecida al procesamiento de metales y aleaciones, el procesamiento de los termoplásticos depende de nuestra habilidad para fundirlos y procesarlos por extrusión y otros métodos. En capítulos posteriores describiremos esos métodos.

Muchos polímeros al enfriarlos no cristalizan, cuando se solidifican. En ellos puede existir la fuerza termodinámica motriz; sin embargo, la velocidad de nucleación del sólido puede ser muy baja o la complejidad de las cadenas de polímero puede ser tan grande que no se forma un sólido cristalino. En los polímeros, casi nunca se completa la cristalización y es bastante distinta de la de los materiales metálicos, porque requiere que las largas cadenas de polímero se alineen estrechamente en distancias relativamente grandes. Al hacerlo, los polímeros crecen en forma de cristales **lamelares**, es decir, en forma de plaquillas o lamelas (Fig. 8-27). La región entre cada lamela consiste de cadenas de polímero con estructura amorfa. Las regiones amorfas existen entre las lamelas individuales, arreglos de lamelas y esferulitas individuales. Además, los arreglos de lamelas crecen en torno a un núcleo común, pero la orientación cristalográfica de las lamelas en cualquier otro arreglo es distinta. Al crecer los arreglos pueden producir una forma esferoidal llamada **esferulita**. La esferulita está formada por muchos arreglos individuales de lamelas con orientación distinta.

Muchos polímeros de interés general desarrollan cristalinidad durante su procesamiento. La cristalinidad se puede originar en un enfriamiento como los que se describieron arriba o por

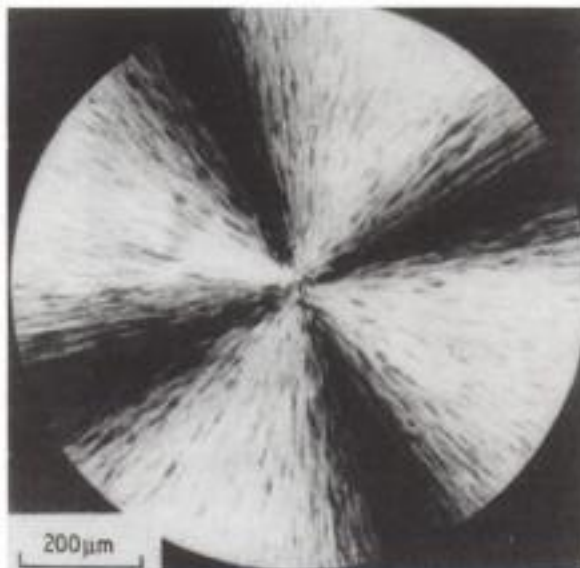


Figura 8-27
Una esferulita en poliestireno (8000×).
(De R. Young y P. Lovell, *Introduction to Polymers*, 2a. ed., Chapman & Hall, 1991.)

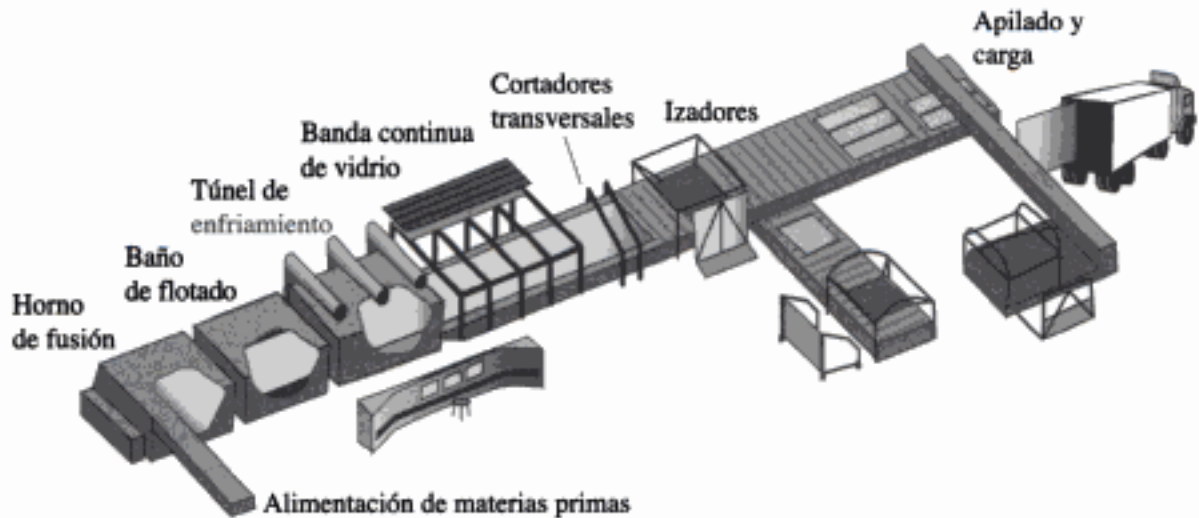


Figura 8-28 Esquema del proceso de vidrio flotado. (Fuente: www.glassrecruiters.com.)

la aplicación de un esfuerzo. Por ejemplo, en los capítulos anteriores hemos aprendido cómo se preparan botellas de plástico PET con el proceso de soplado y estiramiento (capítulos 3 y 4) y cómo pueden desarrollar una cristalinidad considerable durante su formación. Esta cristalización es resultado de la aplicación de un esfuerzo y, como tal, es distinta de la que se encuentra en la solidificación de los metales y las aleaciones. En general, los polímeros como el nylon y el polietileno cristalizan con mayor facilidad en comparación con los demás termoplásticos.

Los vidrios inorgánicos, como por ejemplo, los vidrios de silicato, tampoco cristalizan con facilidad, por razones cinéticas. Si bien existe la fuerza termodinámica motriz, como en la solidificación de los metales y las aleaciones, sin embargo los fundidos suelen ser demasiado viscosos y la difusión es demasiado lenta para que avance la cristalización durante la solidificación. Para fundir y moldear piezas grandes y planas de vidrio, se usa el proceso de vidrio flotado (Fig. 8-28). En este proceso, se hace flotar vidrio fundido sobre estaño fundido. Como se describió en el capítulo 6, dado que la resistencia de los vidrios inorgánicos depende de imperfecciones superficiales producidas por el proceso de manufactura o por la reacción con la humedad atmosférica, a la mayoría de los vidrios se les fortalece por templado. Cuando no importa mucho la seguridad, para reducir los esfuerzos se usa el recocido. Los tramos largos de fibras de vidrio, como las que se usan en las fibras ópticas, se producen fundiendo una barra de vidrio de alta pureza llamada **preforma**. Como se mencionó antes, con un control cuidadoso de la nucleación en los vidrios se pueden obtener vitrocerámicos, vidrios de color y vidrios fotocromáticos (que pueden cambiar su color o matiz al exponerlos a la luz solar).

8-13 Unión de materiales metálicos

En el **latonado** o **soldadura fuerte**, se usa un metal de relleno, o de *aporte*, para unir a un metal consigo mismo o con otro distinto. El metal de aporte en el latonado tiene una temperatura de fusión mayor a 450 °C. El **estañado** es un proceso como el anterior en el que el metal de aporte tiene una temperatura de fusión menor a 450 °C. Los materiales que más se usan en el estañado son aleaciones de plomo-estaño y antimonio-estaño. En la actualidad existe la necesidad de desarrollar materiales de estañado sin plomo, por la toxicidad de este último. Entre las aleaciones que se están desarrollando, se encuentran las basadas en Sn-Cu-Ag.[12] En el latonado y el estañado, los materiales metálicos que se unen no se funden; sólo el material de

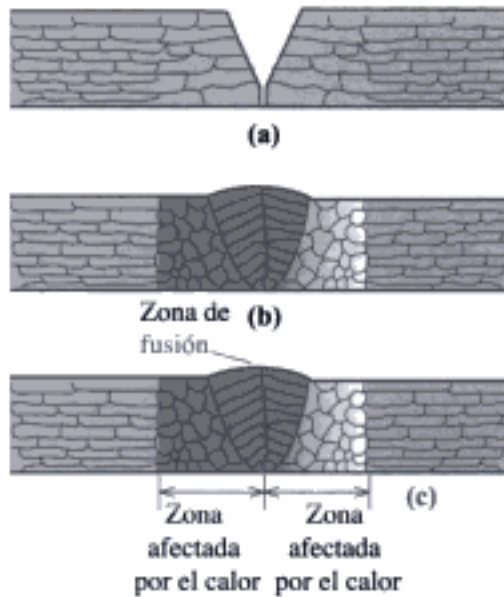


Figura 8-29

Esquema de la zona de fusión y de solidificación de una soldadura de fusión: (a) unión con preparación inicial, (b) soldadura a la temperatura máxima, con la unión llena de metal de aporte y (c) soldadura después de la solidificación.

aporte es el que se funde. Tanto en el latonado como en el estañado, la composición del material de aporte es distinta a la del metal que se está pegando. En el latonado se usan diversas aleaciones de aluminio-silicio, cobre, magnesio y metales preciosos.

La solidificación también es importante en la unión de metales con **soldadura de fusión**. [13,14] En estos procesos, se funde una parte de los metales que se van a unir y, en muchos casos, se agrega metal adicional de aporte, también fundido. A la región de metal líquido se le llama **zona de fusión** (Figs. 8-29 y 8-30). Cuando después se solidifica la zona de fusión, las piezas originales de metal quedan unidas entre sí. Durante la solidificación de la zona de fusión, no se requiere nucleación. El sólido sólo comienza a crecer a partir de los granos existentes, frecuentemente en forma columnar. El crecimiento de los granos de sólido en la zona de fusión, a partir de los granos preexistentes, es epitáxico.

La estructura y las propiedades de la zona de fusión dependen de muchas de las mismas variables que en el vaciado de metales. La adición de agentes inoculantes a la zona de fusión

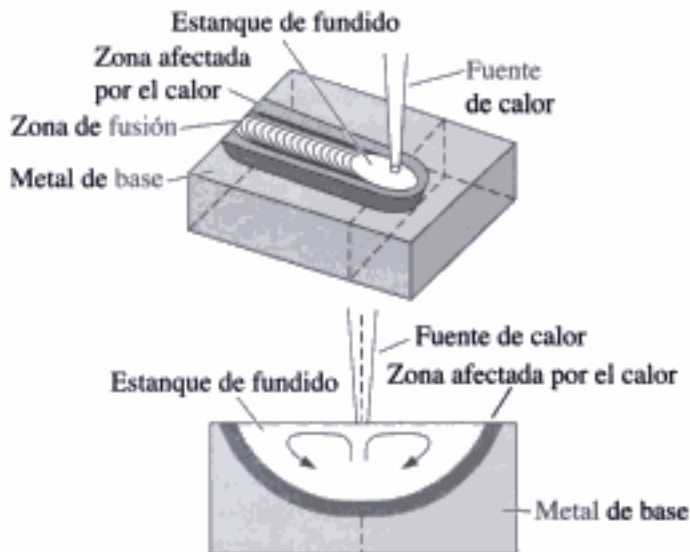


Figura 8-30

Esquema que muestra la interacción entre la fuente de calor y el metal base. Se observan tres zonas distintas en la soldadura: zona de fusión, zona afectada por el calor y el metal base. (Fuente: Reimpreso con autorización de "Current Issues and Problems in Welding Science", por S.A. David y T. DebRoy, 1992, Science, 257, pp. 497-502, fig. 2. Copyright © 1992, American Association for the Advancement of Science.)

reduce el tamaño de grano. Las grandes velocidades de enfriamiento o los tiempos cortos de solidificación generan una microestructura más fina y mejores propiedades. Entre los factores que aumentan la velocidad de enfriamiento, se encuentran el mayor grosor del metal, las zonas de fusión más pequeñas, las temperaturas bajas del metal y ciertas clases de procesos de soldadura. Por ejemplo, la soldadura con oxiacetileno usa una fuente de calor de intensidad relativamente baja; en consecuencia, los tiempos de soldadura son largos y el metal sólido adyacente, que se calienta mucho, no es un radiador eficiente. Los procesos de soldadura con arco proporcionan una fuente de calor más intenso, lo cual reduce el calentamiento del metal vecino y permite un enfriamiento más rápido. Las soldaduras con láser y con haz de electrones tienen unas fuentes de calor de intensidad excepcional y producen unas velocidades de enfriamiento muy grandes; las uniones son potencialmente muy resistentes. Se ha desarrollado el proceso de agitación con fricción para aleaciones de Al y Al-Li para aplicaciones aeroespaciales.

RESUMEN

- La transformación de líquido a sólido es, posiblemente, la transformación de fase más importante en la ciencia e ingeniería de los materiales, por sus aplicaciones.
- La solidificación desempeña un papel importante en el procesamiento de metales, aleaciones, termoplásticos y vidrios inorgánicos. También es importante en el procesamiento de vitrocerámicos y en técnicas para unir materiales metálicos.
- La nucleación produce una partícula sólida de tamaño crítico, a partir del material líquido. La formación de núcleos está determinada por la fuerza motriz termodinámica de la solidificación, y a ella se opone la necesidad de crear interfaz sólido-líquido. Como resultado, puede suceder que no haya solidificación a la temperatura de solidificación.
- En la nucleación homogénea se requieren grandes subenfriamientos del líquido, y no se observa en el procesamiento normal de solidificación. Al introducir partículas extrañas en el líquido, se aportan núcleos para la nucleación heterogénea. Esto se hace en la práctica por inoculación o refinación del grano. Este proceso permite controlar el tamaño de grano de la pieza vaciada.
- El enfriamiento rápido del líquido puede evitar la nucleación y el crecimiento, produciendo sólidos amorfos o vidrios, con propiedades mecánicas y físicas excepcionales. Los materiales poliméricos, metálicos e inorgánicos se pueden preparar en forma de vidrios amorfos.
- En la solidificación a partir de fundidos, el crecimiento sucede cuando los núcleos crecen en el material líquido. Se pueden observar modos de crecimiento plano o crecimiento dendrítico. En el crecimiento plano, crece una interfaz sólido-líquido lisa, con poco o ningún subenfriamiento del líquido. Varios procesos de solidificación direccionales aprovechan el crecimiento plano. El crecimiento dendrítico se produce cuando se subenfía el líquido. El enfriamiento rápido, o el corto tiempo de solidificación, produce una estructura dendrítica más fina y frecuentemente mejora las propiedades mecánicas en una pieza vaciada metálica.
- Se puede usar la regla de Chvorinov, $t_f = B(V/A)^n$, para estimar el tiempo de solidificación de una pieza vaciada. Las piezas vaciadas metálicas con menor distancia interdendrítica y tamaño de grano más fino tienen las mayores resistencias.
- Se pueden usar curvas de enfriamiento para determinar la temperatura de vaciado, observar el subenfriamiento, la recalcancia y el tiempo de solidificación.

- Al controlar su nucleación y crecimiento, a una pieza vaciada se le puede dar una estructura columnar de grano, una estructura equiaxial de grano o una mezcla de ambas. El comportamiento isotrópico es característico de los granos equiaxiales, mientras que el comportamiento anisotrópico se encuentra en los granos columnares.
- Las porosidades y las contracciones son defectos grandes que pueden presentarse en los productos vaciados. En caso de presentarse, pueden hacer que los productos fallen catastróficamente.
- En los métodos comerciales de procesamiento por solidificación, se pueden controlar los defectos de una pieza (por ejemplo, contracción en solidificación o sopladuras) con un diseño adecuado del sistema de pieza vaciada y mazarota, y con el tratamiento adecuado del metal líquido antes de vaciarlo.
- El vaciado en arena, el vaciado al modelo perdido y el vaciado a presión son algunos de los procesos para vaciar componentes. El vaciado de lingotes y la colada continua se emplean en la producción y el reciclado de metales y aleaciones.
- El proceso de solidificación se puede controlar con cuidado para obtener materiales solidificados en forma direccional, y también monocristales. En los procesos equiaxiales se puede hacer que coincidan la estructura cristalina del sustrato y del material que se deposita, y son útiles para fabricar dispositivos electrónicos y de otra índole.

GLOSARIO

Acero inoxidable Aleación resistente a la corrosión, formada por Fe-Cr-Ni-C.

Aleaciones formadoras de piel Aleaciones cuya microestructura presenta una cáscara externa de granos pequeños en la zona de temple seguidos por dendritas.

Aleaciones pastosas Aleaciones cuyas piezas vaciadas tienen una macroestructura formada principalmente por granos equiaxiales. Se llaman así porque, al vaciarlo, el material parece como un líquido pastoso de granos sólidos que flotan en un material líquido.

Calor específico Calor requerido para cambiar un grado la temperatura de una unidad de peso del material.

Calor latente de fusión (ΔH_f) Calor desprendido cuando se solidifica un líquido. El calor latente de fusión se relaciona con la diferencia de energías entre el sólido y el líquido.

Cavidades Pequeños agujeros presentes en una pieza colada.

Colada continua Proceso para convertir metal o aleación fundida en un producto semiterminado; por ejemplo, una placa.

Constante de molde (B) Constante característica en la regla de Chvorinov.

Contracción Encogimiento o contracción de una pieza colada durante la solidificación.

Contracción interdendrítica Pequeños poros entre los brazos de dendrita formados por la contracción que acompaña a la solidificación. También se llaman microporosidad o porosidad por contracción.

Crecimiento Proceso físico por el cual una fase nueva aumenta de tamaño. En el caso de la solidificación, se refiere a la formación de un sólido estable cuando se solidifica el líquido.

Crecimiento epitáxico Crecimiento de un material por epitaxia o epitaxis.

Crecimiento plano Crecimiento de una interfaz sólido-líquido lisa durante la solidificación, cuando no hay subenfriamiento del líquido.

Dendrita Estructura arbórea del sólido que crece cuando se solidifica un líquido subenfriado.

Descarburización con argón y oxígeno (AOD) Proceso para refinar acero inoxidable. El carbono disuelto en el acero inoxidable fundido se reduce soplando argón gaseoso mezclado con oxígeno.

Diagramas de fase Diagramas que describen qué fases se espera que sean estables, desde el punto de vista termodinámico, para cualquier sistema formado por uno o más elementos o compuestos.

Distancia entre brazos dendríticos secundarios (SDAS) Distancia entre los centros de dos brazos secundarios y adyacentes de dendrita.

Endurecimiento por dispersión Aumento de resistencia de un material metálico al generar resistencia contra el movimiento de dislocaciones mediante la introducción de pequeñas partículas de un segundo material.

Embrión Partícula diminuta de sólido que se forma en el líquido a medida que se agrupan átomos entre sí. El embrión puede crecer y formar un núcleo estable o se puede redissolver.

Epitaxia Proceso con el que se hace crecer un material en forma orientada, usando un sustrato que coincide cristalográficamente con el material que se está creciendo.

Esferulita Cristales con forma esférica producidos cuando se solidifican ciertos polímeros.

Estañado Proceso de unión en el que el metal de aporte tiene una temperatura de fusión menor a 450 °C, sin que haya fusión de los materiales de base.

Estructura de lingote Macroestructura de una pieza colada que incluye la zona de enfriamiento rápido, la zona columnar y la zona equiaxial.

Frente de solidificación La interfaz sólido-líquido.

Heteroepitaxia Crecimiento de un material muy orientado sobre un sustrato de material distinto. Normalmente, el material que se deposita y el sustrato tienen estructuras cristalinas y constantes de red parecidas.

Homoepitaxia Crecimiento de un material muy orientado sobre un cristal del mismo material. El material que se deposita puede contener dopantes útiles.

Inoculación Adición de núcleos heterogéneos en forma controlada para aumentar la cantidad de granos en una pieza vaciada o colada.

Inoculantes Materiales que promueven la nucleación heterogénea durante la solidificación de un material.

Lamelar Arreglo de cristales en forma de pequeñas placas dentro de un material.

Latonado o soldadura fuerte Una aleación, conocida como aporte, se usa para unir entre sí a dos materiales. La composición del metal de aporte, que tiene una temperatura de fusión mayor que 450 °C, es muy distinta de la de los metales que se unen.

Lavado con gas o burbujeo Proceso en el que se inyecta una corriente de gas en un metal fundido para eliminar un gas disuelto en el metal, que podría producir porosidades.

Ley de Sievert La cantidad de gas que se disuelve en un metal es proporcional a la presión parcial del gas en los alrededores.

Lingote Pieza colada simple que generalmente otro usuario funde o reprocesa para obtener otra forma útil.

Mazarota Recipiente adicional de metal líquido, conectado a una pieza colada. Si la mazarota se solidifica después de la colada, puede aportar el metal líquido para compensar la contracción.

Meseta térmica Meseta en la curva de enfriamiento durante la solidificación de un material, causada por la evolución del calor latente de fusión durante la solidificación. Esta generación de calor compensa el calor que se pierde por enfriamiento.

Microcontracción o microporosidad Poros pequeños, con frecuencia aislados entre los brazos de las dendritas, que se forman por la contracción que acompaña la solidificación. También se llama porosidad por contracción.

Nucleación Proceso físico por el cual se produce una fase nueva en un material. En el caso de la solidificación, indica la formación de partículas sólidas diminutas y estables en el líquido.

Nucleación heterogénea Formación de un sólido de tamaño crítico a partir de líquido, sobre la superficie de una impureza.

Nucleación homogénea Formación de un sólido de tamaño crítico a partir del líquido, por la agrupación de una gran cantidad de átomos bajo un gran subenfriamiento (sin interfaz externa).

Núcleos Partículas diminutas de sólido que se forman a partir del líquido cuando los átomos se congregan. Como esas partículas son lo bastante grandes para ser estables, se ha efectuado la nucleación y puede comenzar el crecimiento del sólido.

Porosidad por contracción Poros pequeños entre los brazos de dendrita, formados por la contracción que acompaña la solidificación. También se llama microporosidad o porosidad interdendrítica.

Preforma Componente a partir del cual se obtiene un alambre o se fabrica una botella.

Procesamiento por solidificación rápida Producción de estructuras únicas de material por la promoción de velocidades extremadamente altas de enfriamiento durante la solidificación.

Procesamiento primario Proceso que implica colar metales fundidos para formar lingotes o formas útiles semiterminadas; por ejemplo, placas gruesas.

Procesamiento secundario Procesos como laminación, extrusión, etc., para procesar lingotes o palanquillas y otras formas semiterminadas.

Proceso a la cera perdida Proceso en el cual se usa un modelo de cera para colar un metal.

Proceso a la espuma perdida Proceso en el cual se usa una espuma de polímero como modelo para producir una pieza colada.

Proceso Czochralski Proceso para hacer crecer monocristales. Se usa un cristal pequeño como semilla.

Proceso de Bridgman Proceso para hacer crecer semiconductores y otros monocristales.

Proceso de solidificación Procesamiento de los materiales donde interviene la solidificación; por ejemplo, crecimiento de monocristal, colada continua, etcétera.

Puntos cuánticos Agregados nanométricos de semiconductores que tienen propiedades distintas (como el ancho de banda) de los materiales a granel.

Radio crítico (r^*) Tamaño mínimo que deben formar los átomos agrupándose en el líquido para que la partícula sólida sea estable y comience a crecer.

Recalescencia Aumento de temperatura de un metal líquido subenfriado, resultado de la liberación de calor durante la nucleación.

Rechufe Hueco o cavidad grande dentro de una pieza vaciada, causado por la contracción volumétrica que ocurre durante la solidificación.

Rechupes Hueco grande en forma de cono, en la superficie de una pieza vaciada, causado por la contracción volumétrica que ocurre durante la solidificación.

Refinación del grano Adición en forma controlada de núcleos heterogéneos para aumentar la cantidad de granos en una pieza colada.

Regla de Chvorinov El tiempo de solidificación de una pieza vaciada es directamente proporcional al cuadrado de la relación de volumen a superficie en la pieza vaciada.

Sobrecalentar Temperatura de vaciado menos la temperatura de solidificación.

Soldadura de fusión Procesos de unión en los que se debe fundir una parte de los materiales para lograr una buena unión.

Solidificación direccional (DS) Técnica de solidificación en la que el crecimiento en determinada dirección produce un crecimiento preferencial de granos en la dirección opuesta, produciendo una microestructura anisotrópica y orientada.

Sopladuras Burbujas de gas aprisionadas en el interior de una pieza durante su solidificación; se deben a la menor solubilidad del gas en el sólido en comparación con el líquido.

Subenfriamiento Temperatura a la cual se debe enfriar el metal líquido por debajo de la temperatura de equilibrio de solidificación antes de que comience la nucleación.

Temperatura de vaciado Temperatura de un metal o una aleación cuando se vierte en un molde durante el proceso de vaciado.

Tiempo local de solidificación Tiempo necesario para que determinado lugar en una pieza colada se solidifique una vez iniciada la nucleación.

Tiempo total de solidificación Tiempo requerido para que la pieza se solidifique por completo después de que se ha efectuado el vaciado.

Transformación de fase en estado sólido Cambio de fase que sucede en el estado sólido.

Vaciado a presión Proceso de colado en el cual los metales o aleaciones fundidos son forzados a entrar a presión en un molde o dado.

Vaciado de lingote Proceso de colar lingotes. Es distinto del proceso de colada continua.

Vaciado en arena Proceso de colado donde se usan moldes de arena.

Vaciado en modelo perdido Proceso de vaciado que se usa para obtener formas complicadas, como las de los álabes de turbina; también se llama proceso a la cera perdida.

Vaciado en molde permanente Proceso de vaciado en el que se puede usar un molde muchas veces.

Vidrios fotocromáticos Vidrios que cambian de color o de matiz al exponerlos a la luz solar.

Vitrocerámicos Materiales policristalinos de grano ultrafino obtenidos por cristalización controlada de vidrios amorfos.

Zona columnar Región de granos alargados que tienen una orientación preferida, que se forma como resultado del crecimiento competitivo durante la solidificación de una pieza vaciada.

Zona de enfriamiento rápido Región de granos pequeños y orientados al azar que se forma en la superficie de una pieza colada como resultado de la nucleación heterogénea.

Zona de fusión Parte de una soldadura que se calienta para producir todo el líquido durante el proceso de fusión. La solidificación de la zona de fusión es la que produce la unión.

Zona equiáxica o equidimensional Región de granos con orientación aleatoria, en el centro de una pieza colada; se produce como resultado de una nucleación copiosa.

ADICIONAL

1. KURZ, W. y FISHER, D.J. *Fundamentals of Solidification*, Trans-Tech, 1998.
2. BRONOWSKI, J. *The Ascent of Man*, Back Bay Books, 1973, pp. 124-131.
3. LEE, H.W.H. et al. *Quantum Confined Electron-Hole States in ZnSe Quantum Dots*, en *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 571—*Semiconductor Quantum Dots*, 2000.
4. BEALL, G.H. "Glass-Ceramics", en *Advances in Ceramics*, vol. 18, Commercial Glasses, BOYD, D.C. y MACDOWELL, J.F., Eds., American Ceramic Society, 1986, pp. 157-173.
5. KINGERY, W.D., BOWEN, H.K. y UHLMANN, D.R. *Introduction to Ceramics*, 2a. ed., Wiley, 1976.
6. BROWN, R. "Man-Made Snow", *Scientific American*, enero de 1992.
7. CHVORINOV, N. *Proc. Inst. British Found.*, 32, 1938-1939, p. 229.
8. VERHOEVEN, J.D. *Fundamentals of Physical Metallurgy*, Wiley, 1975.
9. DEGARMO, E.P., BLACK, J.T. y KOSHE, R.A. *Materials and Processes in Manufacturing*, 8a. ed., Prentice Hall, 1997.
10. SINGH, J. *Optoelectronics: An Introduction to Materials and Devices*, 1996.
11. MAHAJAN, S. y SREE HARSHA, K.S. *Principles of Growth and Processing of Semiconductors*, McGraw Hill, 1999.
12. RAO, M. "A Primer on Lead Free Solder", *Chip Scale Review*, marzo-abril de 2000.
13. DEBROY, T. y DAVID, S.A. "Physical Processes in Fusion Welding", *Reviews of Modern Physics*, 67(1), 1995, pp. 85-112.
14. DAVID, S.A. y DEBROY, T. "Current Issues and Problems in Welding Science", *Science*, 257, 1992, pp. 497-502.



Sección 8-1 Importancia tecnológica

- 8-1 Proporcione ejemplos de materiales a base de vidrios inorgánicos que se fabriquen por solidificación.
- 8-2 ¿Qué significan "procesamiento primario" y "procesamiento secundario"?
- 8-3 ¿Por qué los materiales cerámicos no se preparan por fusión y vaciado?

Sección 8-2 Nucleación

- 8-4 Defina los siguientes términos: nucleación, embrión, nucleación heterogénea y nucleación homogénea.
- 8-5 El agua ¿se congela a 0 °C y hierve a 100 °C? Explique su respuesta.
- 8-6 ¿Se funde el hielo a 0 °C? Explique su respuesta.
- 8-7 Suponga que en lugar de un núcleo esférico tuviéramos un núcleo en forma de cubo de largo x . Calcule la dimensión crítica x^* del cubo necesaria para la nucleación. Escriba una ecuación parecida a la ecuación

8-1, pero para un núcleo cúbico, y deduzca una ecuación para x^* similar a la ecuación 8-2.

- 8-8 ¿Por qué los núcleos que se ven en forma experimental son frecuentemente esféricos pero con facetas? ¿Por qué son esféricos y no cubos u otras formas?
- 8-9 Explique el significado de cada término de la ecuación 8-2.
- 8-10 Suponga que se subenfria níquel líquido hasta que hay nucleación homogénea. Calcule
 - a) el radio crítico del núcleo necesario y
 - b) la cantidad de átomos de níquel en el núcleo.
 Suponga que el parámetro de red del níquel FCC sólido es de 0.356 nm.
- 8-11 Suponga que se subenfria hierro líquido hasta que se presenta la nucleación homogénea. Calcule
 - a) el radio crítico del núcleo requerido y
 - b) la cantidad de átomos de hierro en el núcleo.
 Suponga que el parámetro de red del hierro BCC sólido es de 2.92 Å.

- 8-12 Suponga que el níquel sólido pudiera nuclear en forma homogénea con un subenfriamiento de sólo 22 °C. ¿Cuántos átomos sería necesario agrupar espontáneamente para que esto sucediera? Suponga que el parámetro de red del níquel FCC sólido es de 0.356 nm.
- 8-13 Suponga que el hierro sólido pudiera nuclear en forma homogénea con un subenfriamiento de sólo 15 °C. ¿Cuántos átomos sería necesario agrupar espontáneamente para que esto sucediera? Suponga que el parámetro de red del hierro BCC es de 2.92 Å.
- 8-14 Calcule la fracción de solidificación que sucede en forma dendrítica cuando se nuclea el hierro
- con subenfriamiento de 10 °C,
 - con subenfriamiento de 100 °C y
 - en forma homogénea.
- El calor específico del hierro es de $5.78 \text{ J/cm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$.

Sección 8-3 Aplicaciones de la nucleación controlada

- 8-15 Explique el término inoculación.
- 8-16 Explique cómo se pueden endurecer las aleaciones de aluminio con pequeñas cantidades de titanio y boro agregados.
- 8-17 Describa las semejanzas y las diferencias entre los mecanismos de resistencia por tamaño de grano y endurecimiento por deformación.
- 8-18 ¿Qué es endurecimiento por segunda fase?
- 8-19 ¿Por qué muchos fundidos inorgánicos se solidifican formando materiales amorfos con más facilidad en comparación con los materiales metálicos?
- 8-20 ¿Qué es un vitrocerámico? ¿Cómo se fabrican los vitrocerámicos?
- 8-21 ¿Qué es un vidrio fotocromático?
- 8-22 ¿Qué es un vidrio metálico?
- 8-23 ¿Cómo fabrican nieve las máquinas de los centros turísticos para esquiadores?

Sección 8-4 Mecanismos de crecimiento

- 8-24 ¿Cuáles son los dos pasos que se encuentran en la solidificación de los metales fundidos? En función del tiempo ¿se pueden traslapar entre sí?
- 8-25 Durante la solidificación, se deben eliminar el calor específico del material y el calor latente de fusión. Defina cada uno de esos términos.
- 8-26 Describa bajo qué condiciones se espera que los metales fundidos sufran solidificación dendrítica.
- 8-27 Describa bajo qué condiciones cabe esperar que los metales fundidos sufran solidificación con frente plano.

- 8-28 Calcule la fracción de solidificación que sucede en forma dendrítica cuando nuclea la plata
- con subenfriamiento de 10 °C,
 - con subenfriamiento de 100 °C y
 - en forma homogénea.
- El calor específico de la plata es de $3.25 \text{ J/cm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$.
- 8-29 El análisis de una pieza colada de níquel parece indicar que el 28% del proceso de solidificación fue en forma dendrítica. Calcule la temperatura a la que sucedió la nucleación. El calor específico del níquel es de $4.1 \text{ J/cm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$.

Sección 8-5 Tiempo de solidificación y tamaño de dendrita

- 8-30 Escriba la regla de Chvorinov y explique el significado de cada término.
- 8-31 Un cubo de 2 pulg de lado se solidifica en 4.6 min. Calcule:
- la constante del molde en la regla de Chvorinov y
 - el tiempo de solidificación para una barra de 0.5 pulg $\times$ 0.5 pulg $\times$ 6 pulg colada bajo las mismas condiciones.
- Suponga que $n = 2$.
- 8-32 Una esfera de 5 cm de diámetro se solidifica en 1050 s. Calcule el tiempo de solidificación para una placa fundida de $0.3 \times 10 \times 20$ cm colada bajo las mismas condiciones. Suponga que $n = 2$.
- 8-33 Determine las constantes B y n en la regla de Chvorinov graficando los datos siguientes en escala log-log:

Dimensiones de la pieza (pulg)	Tiempo de solidificación (min)
$0.5 \times 8 \times 12$	3.48
$2 \times 3 \times 10$	15.78
2.5 cubo	10.17
$1 \times 4 \times 98.13$	

- 8-34 Determine las constantes B y n en la regla de Chvorinov, graficando los datos siguientes en escala log-log:

Dimensiones de la pieza (cm)	Tiempo de solidificación (s)
$1 \times 1 \times 6$	28.58
$2 \times 4 \times 4$	98.30
$4 \times 4 \times 4$	155.89
$8 \times 6 \times 5$	306.15

- 8-35 Se produjo una pieza de 3 pulg de diámetro. Los tiempos necesarios para que la interfaz sólido-líquido alcanzaran distintas profundidades bajo la superficie colada se midieron y se muestran en la siguiente tabla:

Distancia a la superficie (pulg)	Tiempo (s)
0.1	32.6
0.3	73.5
0.5	130.6
0.75	225.0
1.0	334.9

Determine:

- el tiempo en el que comienza la solidificación en la superficie y
- el tiempo en el que se espera que solidifique toda la pieza.
- Suponga que el centro de la pieza se solidificó en realidad en 720 s. Explique por qué este tiempo puede ser distinto del calculado en la parte (b).

8-36 La figura 8-9(b) muestra una fotografía de una aleación de aluminio. Estime

- la distancia entre brazos dendríticos secundarios y
- el tiempo de solidificación local para esa área de la pieza.

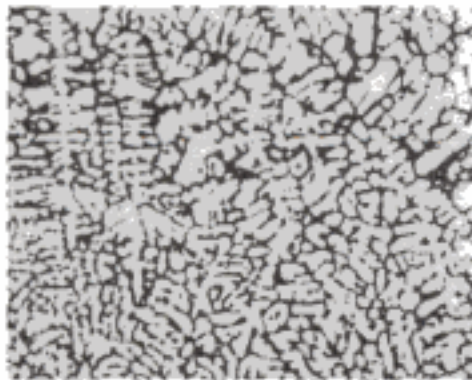


Figura 8-9 (Repetida para el problema 8-36) (b) Dendritas en una aleación de aluminio (50×). (De ASM Handbook, vol. 9, Metallography and Microstructure (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)

8-37 La figura 8-31 muestra una fotografía de dendritas de FeO que precipitaron en un vitrocerámico (un líquido subenfriado). Estime la distancia entre brazos dendríticos secundarios.

8-38 Calcule las constantes c y m que relacionan las distancias entre brazos dendríticos secundarios y el tiempo de solidificación local, graficando los datos siguientes en escala log-log:

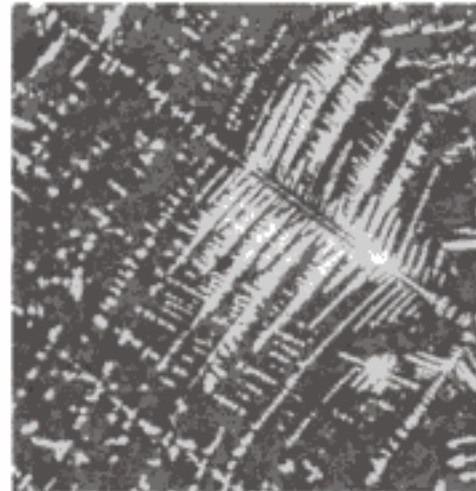


Figura 8-31 Fotomicrografía de dendritas de FeO en un material vitrocerámico (450×) (para el problema 8-37). (Cortesía de C.W. Ramsay, Universidad de Missouri, Rolla.)

Tiempo de solidificación (s)	SDAS (cm)
156	0.0176
282	0.0216
606	0.0282
1356	0.0374

8-39 La figura 8-32 muestra dendritas en una partícula de polvo de titanio que se ha solidificado rápidamente. Suponiendo que el tamaño de las dendritas se relaciona con el tiempo de solidificación mediante la misma ecuación que en el aluminio, estime el tiempo de solidificación de la partícula de polvo.



Figura 8-32 Diminutas dendritas expuestas en una partícula de polvo de titanio producida por solidificación rápida (2200×) (para el problema 8-39). (De J.D. Ayers y K. Moore, "Formation of Metal Carbide Powder by Spark Machining of Reactive Metals", en Metallurgical Transactions, vol. 15A, junio de 1984, p. 1120.)

- 8-40 La distancia entre brazos dendríticos secundarios en una soldadura de cobre con haz de electrones es 9.5×10^{-4} cm. Estime el tiempo de solidificación de la soldadura.

Sección 8-6 Curvas de enfriamiento

- 8-41 Trace un esquema de una curva de enfriamiento de un metal puro e indique cuidadosamente las diversas regiones.
- 8-42 ¿Qué significa el término recalcencia?
- 8-43 ¿Qué es la meseta térmica?
- 8-44 ¿Cuál es la diferencia entre los tiempos de solidificación local y total?
- 8-45 En la figura 8-33 se muestra una curva de enfriamiento. Determine:
- la temperatura de vaciado,
 - la temperatura de solidificación,
 - el sobrecalentamiento,
 - la rapidez de enfriamiento justo antes de que comience la solidificación,
 - el tiempo total de solidificación,
 - el tiempo local de solidificación y
 - la probable identidad del metal.
- h) Si la curva de enfriamiento se obtuvo al centro de la pieza de la figura, determine la constante del molde, suponiendo que $n = 2$.

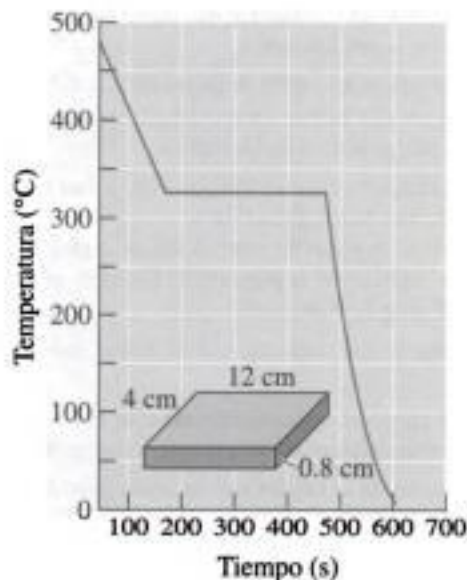


Figura 8-33 Curva de enfriamiento (para el problema 8-45).

- 8-46 En la figura 8-34 se muestra una curva de enfriamiento. Determine:
- la temperatura de vaciado,
 - la temperatura de solidificación,

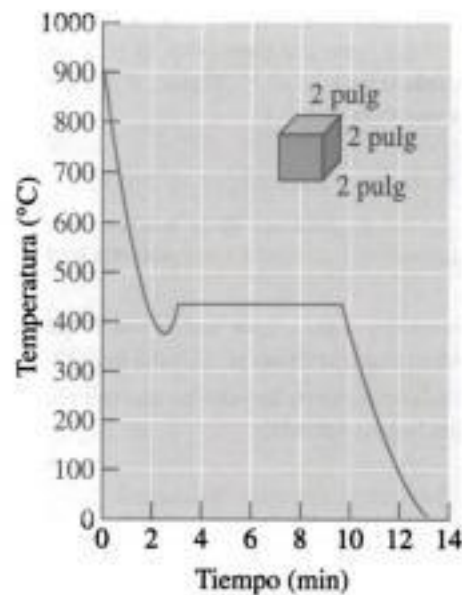


Figura 8-34 Curva de enfriamiento (para el problema 8-46).

- el sobrecalentamiento,
 - la velocidad de enfriamiento justo antes de que comience la solidificación,
 - el tiempo total de solidificación,
 - el tiempo local de solidificación y
 - la probable identidad del metal.
- h) Si la curva de enfriamiento se obtuvo al centro de la pieza de la figura, determine la constante del molde, suponiendo que $n = 2$.
- 8-47 La figura 8-35 muestra las curvas de enfriamiento obtenidas en varios lugares del interior de una pieza colada cilíndrica de aluminio. Determine los tiempos locales de solidificación y el SDAS en cada lugar, y a continuación haga una gráfica de la resistencia a la tensión en función de la distancia a la superficie de la pieza. ¿Recomendaría usted que la pieza se diseñe de tal modo que se deba maquinar una cantidad pequeña o grande de metal durante el acabado? Explique por qué.

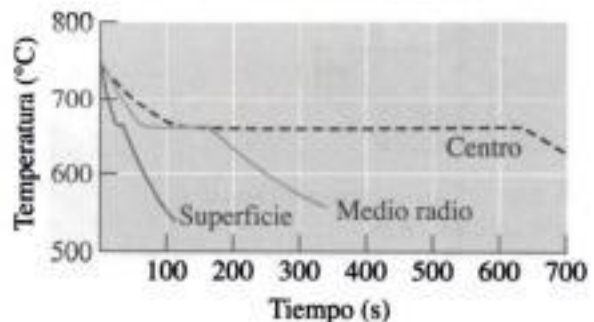


Figura 8-35 Curvas de enfriamiento (para el problema 8-47).

- 8-48 Calcule el volumen, el diámetro y la altura de la mazarota cilíndrica necesaria para evitar el rechupe en una pieza colada de $4 \times 10 \times 20$ pulg, si la relación H/D de la mazarota es 1.5.

Sección 8-7 Estructura de la pieza colada

- 8-49 ¿Cuáles son las propiedades de la macroestructura de un componente vaciado? Explíquelo con un diagrama.
- 8-50 En los materiales colados ¿por qué la solidificación casi siempre comienza en las paredes del molde?
- 8-51 ¿Por qué los componentes forjados no muestran la estructura del lingote vaciado?

Sección 8-8 Defectos de solidificación

- 8-52 ¿Qué clase de defecto en una pieza vaciada puede causar una falla catastrófica en componentes como álabes de turbina? ¿Qué precauciones se toman para evitar la porosidad en las piezas coladas?
- 8-53 En general, en comparación con los componentes preparados con forjado, laminado, extrusión, etc., los productos colados tienden a una menor tenacidad a la fractura. Explique por qué puede ser así.
- 8-54 ¿Qué es una mazarota? ¿Por qué debe solidificarse después de la pieza?
- 8-55 Calcule el volumen, el diámetro y la altura de la mazarota cilíndrica necesaria para evitar la contracción en una pieza de $1 \times 6 \times 6$ pulg, si la relación H/D de la mazarota es 1.0.
- 8-56 La figura 8-36 muestra una mazarota cilíndrica adosada a una pieza colada. Compare los tiempos de solidificación para cada parte de la pieza y la mazarota, y determine si ésta será eficiente.

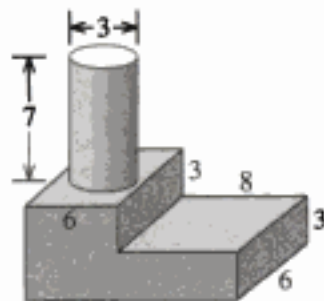


Figura 8-36 Pieza de bloque en escalón (para el problema 8-56).

- 8-57 La figura 8-37 muestra una mazarota cilíndrica adosada a una pieza. Compare los tiempos de solidificación para cada parte de la pieza y la mazarota, y determine si ésta será eficiente.

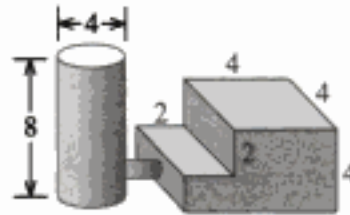


Figura 8-37 Pieza de bloque en escalón (para el problema 8-57).

- 8-58 Una esfera de 4 pulg de diámetro de cobre líquido se deja solidificar y se produce una cavidad esférica de contracción en el centro de la pieza. Compare el volumen y el diámetro del rechupe de esa pieza con el obtenido cuando se deja solidificar una esfera de hierro líquido de 4 pulg de diámetro.
- 8-59 Un cubo de 4 pulg de un metal líquido se deja solidificar. En la pieza colada se observa una cavidad esférica de contracción de 1.49 pulg de diámetro. Determine el cambio porcentual de volumen que sucede durante la solidificación.
- 8-60 Se produce una pieza colada de magnesio de $2 \times 4 \times 6$ cm. Después de enfriar a temperatura ambiente, se encuentra que la pieza pesa 80 g. Determine
- el volumen del rechupe en el centro de la pieza y
 - el porcentaje de contracción que debió haber ocurrido durante la solidificación.
- 8-61 Se produce una pieza colada de hierro de $2 \times 8 \times 10$ pulg y, después de enfriar a temperatura ambiente, se encuentra que pesa 43.9 lb. Determine
- el porcentaje de contracción que debe haber ocurrido durante la solidificación y
 - la cantidad de poros de contracción en la pieza, si toda la contracción se presenta en forma de poros de 0.05 pulg de diámetro.
- 8-62 Dé ejemplos de materiales que se dilatan al solidificarse.
- 8-63 ¿Cómo se puede eliminar o minimizar la porosidad por gases o sopladuras en las aleaciones fundidas?
- 8-64 En el contexto de la fabricación de acero inoxidable ¿qué es descarburización con argón y oxígeno?
- 8-65 Se vierte magnesio líquido en un molde de $2 \times 2 \times 24$ cm y, como consecuencia de la solidificación direccional, toda la contracción por solidificación sucede a lo largo de la pieza. Determine la longitud de la pieza inmediatamente después de terminar la solidificación.
- 8-66 Una fundición (hierro) líquida tiene una densidad de 7.65 g/cm^3 . Inmediatamente después de solidificar, la densidad de la fundición sólida es de 7.71 g/cm^3 . Deter-

mine el cambio porcentual de volumen que hay durante la solidificación. ¿Se expande o se contrae el hierro colado durante la solidificación?

- 8-67 De la figura 8-18, determine la solubilidad del hidrógeno en el aluminio líquido justo antes de comenzar la solidificación, cuando la presión parcial del hidrógeno es de 1 atm. Determine la solubilidad del hidrógeno (en $\text{cm}^3/100 \text{ g de Al}$) a la misma temperatura, si la presión parcial se redujera a 0.01 atm.

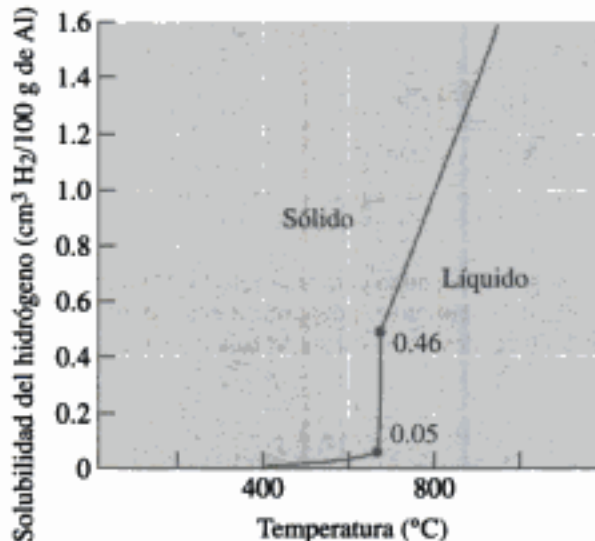


Figura 8-18 (Repetida para el problema 8-67). Solubilidad de hidrógeno gaseoso en aluminio, cuando la presión parcial de $\text{H}_2 = 1 \text{ atm}$.

- 8-68 Se determina la solubilidad del hidrógeno en el aluminio líquido a 715°C y resulta de $1 \text{ cm}^3/100 \text{ g de Al}$. Si todo este hidrógeno precipitara como burbujas de gas durante la solidificación y se quedara aprisionado en la pieza vaciada, calcule el porcentaje de volumen del gas en el aluminio sólido.

Sección 8-9 Procesos de vaciado para fabricar componentes

- 8-69 Escriba el proceso de moldeo en arena verde.
- 8-70 ¿Por qué las piezas vaciadas hechas por fundición a presión posiblemente sean más resistentes que las hechas con el proceso vaciadas en arena?
- 8-71 Una aleación se vacía en un molde de arena y en un molde metálico. ¿Cuál proceso se espera que resulte en una pieza más resistente y por qué?
- 8-72 ¿Qué es el vaciado al modelo perdido? ¿Cuáles son las ventajas de ese vaciado? Explique por qué se usa este proceso con frecuencia para vaciar álabes de turbina.

- 8-73 ¿Por qué la presión es el ingrediente clave en el proceso de fundición a presión?

Sección 8-10 Colada continua y vaciado de lingotes

- 8-74 ¿Qué es un mineral?
- 8-75 Explique en forma breve cómo se fabrica el acero a partir de mineral de hierro, coque y caliza.
- 8-76 Explique cómo se usa la chatarra para fabricar aleaciones.
- 8-77 ¿Qué es un lingote?
- 8-78 ¿Por qué la colada continua de aceros y otras aleaciones tienen cada vez más importancia?
- 8-79 ¿Cuáles son algunos de los pasos que siguen del proceso de colada continua?

Sección 8-11 Solidificación direccional (DS), crecimiento de monocristales y crecimiento epitaxial

- 8-80 Defina el término solidificación direccional.
- 8-81 Explique el papel de los pasos de nucleación y crecimiento en la obtención de monocristales.
- 8-82 ¿Por qué se usan obleas de monocristal de silicio en la fabricación de dispositivos microelectrónicos?
- 8-83 ¿Qué significa el término epitaxia?
- 8-84 El crecimiento epitaxial ¿siempre es a partir de un líquido? Explique por qué.
- 8-85 ¿Qué significan los términos heteroepitaxia y homoeptitaxia?

Sección 8-12 Solidificación de polímeros y vidrios inorgánicos

- 8-86 ¿Por qué la mayoría de los plásticos contienen regiones amorfas y cristalinas?
- 8-87 ¿Qué es una esferulita?
- 8-88 ¿Cómo puede el procesamiento influir sobre la cristalinidad de los polímeros?
- 8-89 Explique por qué los vidrios de silicato tienden a formar vidrios amorfos y, sin embargo, los fundidos metálicos normalmente cristalizan con facilidad.

Sección 8-13 Unión de materiales metálicos

- 8-90 Defina los términos latonado y estañado.
- 8-91 ¿Cuál es la diferencia entre la soldadura por fusión, el latonado y el estañado?
- 8-92 ¿Qué es la zona afectada por el calor?
- 8-93 Explique por qué, si se usan fuentes de calor de baja intensidad, se puede reducir la resistencia del material en la región de una soldadura.

- 8-94 ¿Por qué los procesos de soldadura con láser y con haz de electrones producen uniones más resistentes?

Problemas de diseño

- 8-95 Se funde aluminio bajo condiciones que producen 0.06 cm^3 de H_2 por 100 g de aluminio. Hemos encontrado que no debemos tener más de 0.002 cm^3 de H_2 por 100 g de aluminio, para evitar la formación de sopladuras de hidrógeno durante la solidificación. Diseñe un proceso de tratamiento para el aluminio líquido que asegure que no se forme la porosidad por hidrógeno.
- 8-96 Cuando se unen dos placas de cobre de 0.5 pulg de espesor con un proceso de soldadura con arco, la zona de fusión contiene dendritas con SDAS de 0.006 cm. Sin embargo, este proceso produce grandes esfuerzos residuales en el cordón. Hemos visto que los esfuerzos residuales son bajos cuando las condiciones de soldadura producen SDAS mayor que 0.02 cm. Diseñe un proceso con el que se puedan lograr esfuerzos residuales bajos. Justifique su diseño.
- 8-97 Diseñe un sistema eficiente de mazarotas para la pieza de la figura 8-38. Asegúrese de incluir un esquema del sistema, junto con las dimensiones pertinentes.

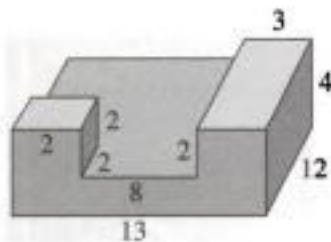


Figura 8-38 Pieza para agregar mazarotas (para el problema 8-97).

- 8-98 Diseñe un proceso que produzca una pieza colada de acero con propiedades uniformes y alta resistencia. Asegúrese de incluir las propiedades microestructurales que desee controlar y explique cómo lo hará.
- 8-99 Se va a fundir a presión aluminio en un molde de acero. La pieza, en esencia, es un cilindro de 12 pulg de longitud y 2 pulg de diámetro, con espesor de pared uniforme, y debe tener una resistencia mínima a la tensión de 40 000 psi. Con base en las propiedades de la figura 8-11, diseñe la pieza y el proceso.

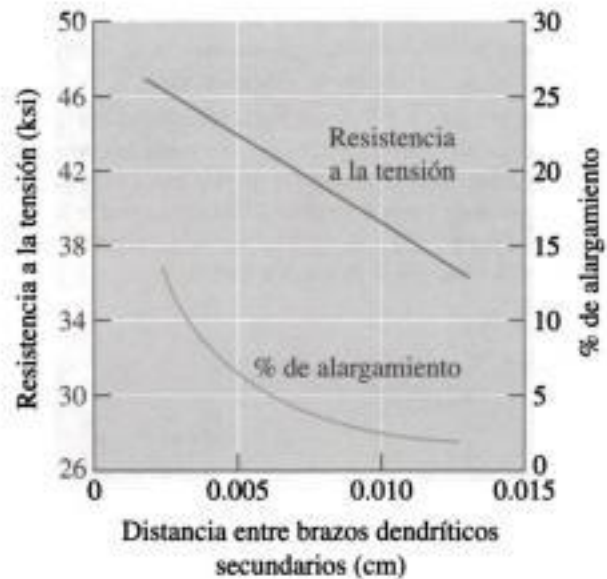


Figura 8-11 (Repetida para el problema 8-99). Efecto de la distancia entre brazos dendríticos secundarios sobre las propiedades de una aleación colada de aluminio.

Problemas en computadora

- 8-100 *Radio crítico para nucleación homogénea.* Escriba un programa que permita calcular el radio crítico de nucleación (r^*). El programa debe pedir al usuario que ingrese los valores de σ_{sp} , T_m , subenfriamiento (ΔT) y entalpía de fusión ΔH_f . Asegúrese de que las peticiones sean correctas, para que los valores se ingresen con las unidades correctas.
- 8-101 *Energía libre de formación de núcleos de tamaño crítico por nucleación heterogénea.* Cuando la nucleación es heterogénea, la energía libre de un núcleo de tamaño crítico ($\Delta G^{*hetero}$) se determina con

$$\Delta G^{*hetero} = \Delta G^{*homo} f(\theta), \text{ donde } f(\theta) = \left(\frac{(2 + \cos \theta)(1 - \cos \theta)^2}{4} \right)$$

$$\text{y } \Delta G^{*homo} = \frac{16\pi\sqrt{\gamma_{sl}^3}}{3\Delta G_v^2}, \text{ que es la energía libre para}$$

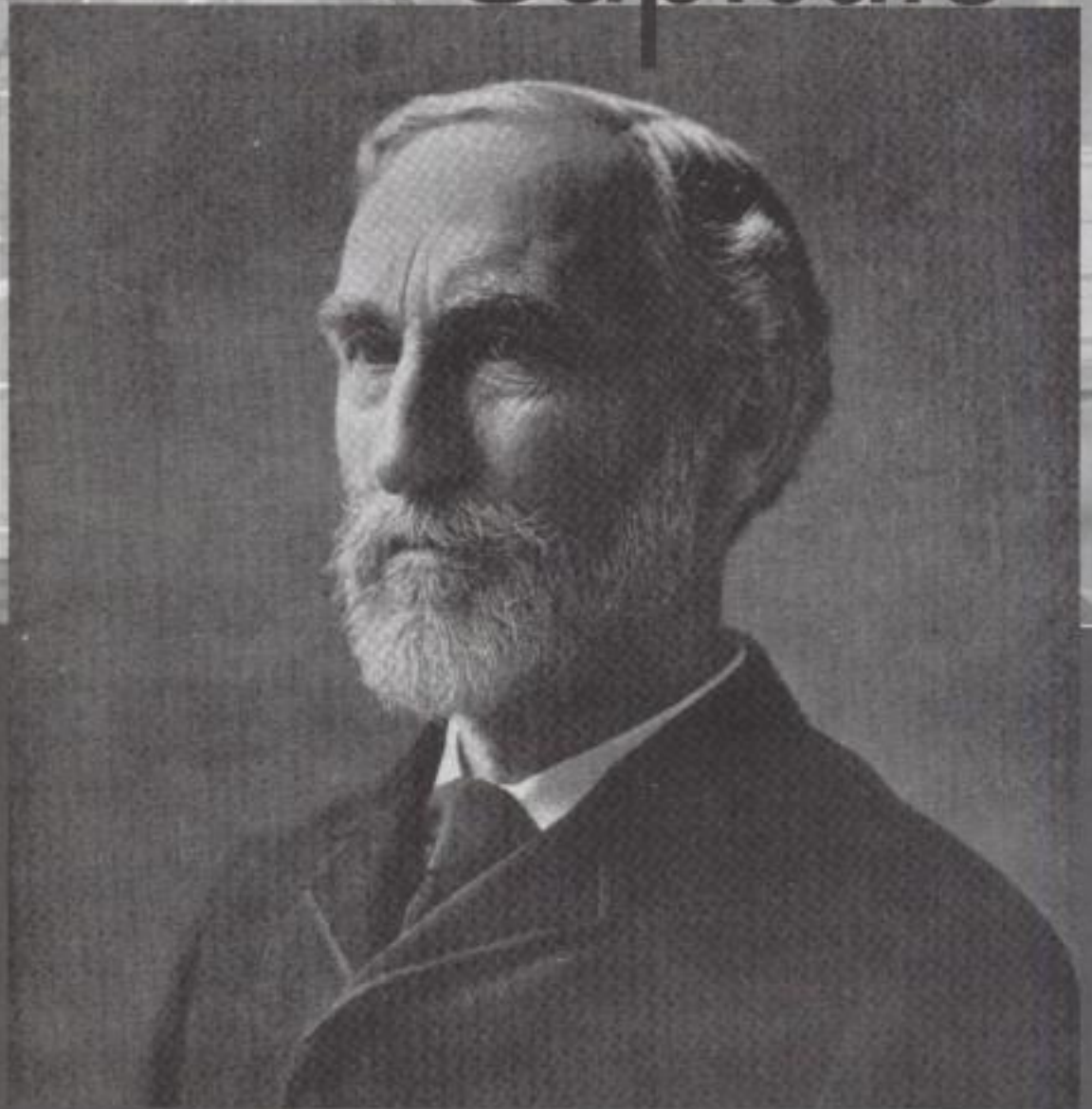
nucleación homogénea de un núcleo de tamaño crítico. Si el ángulo de contacto (θ) de la fase que nuclea en la superficie anterior es de 180° , no hay mojado, y el valor de la función $f(\theta)$ es 1; la energía libre de formación de un núcleo de radio crítico es igual que la de nucleación homogénea.[1] Si la fase nucleante moja por completo al sólido (es decir, $\theta = 0$), entonces $f(\theta) = 0$ y no hay barrera para la nucleación. Escriba

un programa que pida al usuario ingresar los valores de los parámetros necesarios para calcular la energía libre de formación de un núcleo por nucleación homogénea. El programa debe calcular entonces el valor de ΔG^{hetero} en función del ángulo de contacto (θ) que vaya de 0° a 180° . Examine la variación de la energía libre en función del ángulo de contacto.

8-102 *Regla de Chvorinov*. Escriba un programa que calcule el tiempo de solidificación de una pieza colada. El programa debe pedir al usuario que ingrese el volumen de la pieza y su superficie desde la cual se hará la transferencia de calor, así como la constante de molde. A continuación, el programa debe aplicar la regla de Chvorinov para calcular el tiempo de solidificación.

By Arkanosant...

Capítulo



Josiah Willard Gibbs (1839-1903) fue un brillante físico y matemático estadounidense que hizo algunos de los trabajos precursores más importantes en relación con el equilibrio termodinámico. (Cortesía de la biblioteca de la Universidad de Pennsylvania.)

Soluciones sólidas y equilibrio de fases

¿Alguna vez se preguntó...

- ...si es posible que coexistan los estados sólido, líquido y gaseoso de un material?
- ...por qué los patinadores se mueven con tanta facilidad sobre el hielo?
- ...cómo se fabrica el café liofilizado (o secado por congelación)?
- ...qué material se usa para fabricar los diodos emisores de luz roja en las pantallas de muchos productos nuevos?
- ...cuando se solidifica una aleación como el latón, por ejemplo, cuál elemento se solidifica primero, el cobre o el zinc?

Hemos visto que se puede aumentar la resistencia de los materiales metálicos por:

- a) endurecimiento por tamaño de grano (ecuación de Hall-Petch),
- b) trabajo en frío o endurecimiento por deformación,
- c) adiciones de pequeñas cantidades de elementos de aleación y

d) formación de pequeñas partículas de segundas fases.

Estos mecanismos incrementan la resistencia a la cedencia de los materiales metálicos, porque se crean más obstáculos contra el movimiento de las dislocaciones. En este capítulo, comenzaremos a investigar cómo se forman las soluciones sólidas en los sistemas metálicos y cerámicos.

Una solución sólida es un material sólido en el cual los átomos o los iones de los elementos que la forman están dispersos uniformemente. Las propiedades mecánicas, y otras más, de los materiales se pueden controlar creando defectos puntuales; por ejemplo, átomos sustitucionales o intersticiales. En los materiales metálicos, los defectos puntuales perturban el orden atómico del material cristalino e interfieren con el movimiento o deslizamiento de las dislocaciones. En consecuencia, los defectos puntuales causan el endurecimiento por solución sólida.

La introducción de elementos aleantes o impurezas durante el procesamiento cambia la composición del material e influye sobre su comportamiento de solidificación. En este capítulo, examinaremos este efecto introduciendo el concepto de un diagrama de equilibrio de fases. Por ahora, se considerará que una "fase" es una forma única en la que existe el material. Más adelante en el capítulo se definirá el término "fase" con más precisión. Un diagrama de fases ilustra la estabilidad de diversas fases para un conjunto de elementos (por ejemplo, Al y Si). A partir del diagrama de fases, podemos predecir cómo se solidificará un material bajo condiciones de equilibrio. También podremos predecir qué fases se espera sean termodinámicamente estables, y en qué concentración deben estar presentes.

Por tanto, los objetivos principales de este capítulo son estudiar:

1. la formación de soluciones sólidas,
2. los efectos de la formación de soluciones sólidas sobre las propiedades mecánicas de los materiales metálicos,

3. las condiciones bajo las cuales se forman soluciones sólidas,
4. el desarrollo de algunas ideas básicas acerca de los diagramas de fase y
5. el proceso de solidificación en aleaciones simples.

Investigaremos cómo sucede la solidificación de las aleaciones bajo condiciones de equilibrio y fuera de equilibrio. También veremos que el concepto de formación de solución sólida no se limita a los materiales metálicos. Examinaremos cómo se pueden formar soluciones sólidas en ciertos sistemas cerámicos. Ya que la resistencia de los cerámicos depende más de la distribución del tamaño de imperfecciones (y no del movimiento de dislocaciones), el efecto sobre la formación de soluciones sólidas en las propiedades mecánicas de los cerámicos es débil. Sin embargo, las soluciones sólidas cerámicas permiten obtener composiciones exóticas cuyas propiedades dieléctricas o magnéticas se pueden "sintonizar" con precisión. De igual modo, examinaremos cómo se usa la formación de soluciones sólidas para diseñar el ancho de banda de los semiconductores, como los del sistema arseniuro de galio (GaAs)-arseniuro de aluminio (AlAs). La formación de soluciones sólidas en estas clases de materiales permite obtener diodos emisores de luz (LED, *light-emitting diode*) de diversos colores. También indicaremos cómo se aplican ideas parecidas en el diseño de los copolímeros. En el caso de los copolímeros, se pueden proporcionar las propiedades de dos o más polímeros distintos en un material.

9-1 Fases y diagrama de fases

Los elementos metálicos puros tienen aplicaciones técnicas; por ejemplo, el cobre (Cu) o el aluminio (Al) de pureza ultraalta se usan para fabricar circuitos microelectrónicos. Sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones se usan **aleaciones**. Definimos una "aleación" como un material que tiene propiedades metálicas y que está formado por varios elementos. Un **acero al carbono simple** es una aleación de hierro (Fe) y carbono (C). Los **aceros inoxidables**, resistentes a la corrosión, son aleaciones que suelen contener hierro (Fe), carbono (C), cromo (Cr), níquel (Ni) y algunos otros elementos. De igual modo, hay aleaciones a base de aluminio (Al),

cobre (Cu), cobalto (Co), níquel (Ni), titanio (Ti), zinc (Zn) y zirconio (Zr). Hay dos clases de aleaciones: **aleaciones monofásicas** y **aleaciones polifásicas**. En este capítulo, examinaremos el comportamiento de las aleaciones monofásicas. Como primer paso, definamos qué es “fase”, para determinar cómo ayuda la **regla de las fases** para determinar el estado (sólido, líquido o gaseoso) donde existe un material puro.

Se puede definir una **fase** como toda porción, que puede incluir a la totalidad de un sistema, que es físicamente homogénea dentro de sí misma y limitada por una superficie, de tal modo que sea mecánicamente separable de cualquier otra porción.[1] Por ejemplo, el agua tiene tres fases: agua líquida, hielo y vapor de agua. Una fase tiene las siguientes características:

1. tiene la misma estructura o arreglo atómico en su interior,
2. aproximadamente, tiene la misma composición y propiedades en su interior,
3. tiene una interfaz definida entre ésta y las fases que la rodean o están adjuntas.

Por ejemplo, si se encierra un bloque de hielo en una cámara de vacío [Figura 9-1(a)], el hielo comienza a fundirse y algo del agua se evapora. Bajo estas condiciones, tenemos tres fases en coexistencia: H_2O sólida, H_2O líquida y H_2O gaseosa. Cada una de esas formas de H_2O es una fase distinta; cada una tiene un arreglo atómico único, propiedades únicas y un límite definido entre cada forma. Sin embargo, en este caso las fases tienen composición idéntica.

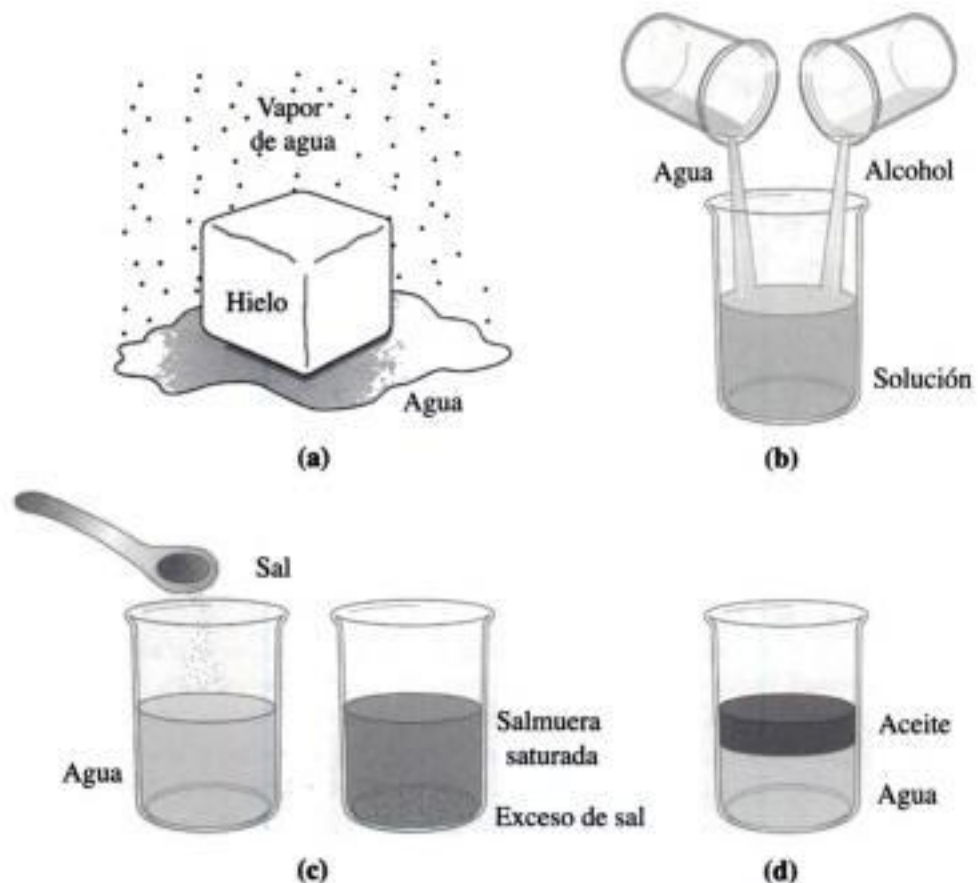


Figura 9-1 Ilustración de fases y solubilidad: (a) las tres formas del agua —gas, líquido y sólido— son, cada una, una fase. (b) El agua y el alcohol tienen solubilidad ilimitada. (c) La sal y el agua tienen solubilidad limitada. (d) El aceite y el agua virtualmente no tienen solubilidad.

Regla de las fases Josiah Willard Gibbs (1839-1903) fue un brillante físico y matemático estadounidense que hizo algunos de los trabajos precursores más importantes en relación con el equilibrio termodinámico.[2] Al principio, sus aportaciones no se conocieron bien en otras partes del mundo, porque se publicaron en una revista estadounidense poco conocida. Sólo después de que Ostwald (en 1892) y le Châtelier (en 1899) tradujeron sus trabajos al alemán y al francés, respectivamente, Gibbs adquirió notoriedad y fama considerables. También, algunas de las deducciones matemáticas en sus trabajos originales, incluyendo la de la regla de las fases, eran complicadas; la mayoría de los fisicoquímicos de aquella época en realidad no apreciaron la importancia de su trabajo.

Gibbs desarrolló la **regla de las fases** entre 1875 y 1876. Describe la relación entre la cantidad de componentes y la cantidad de fases para determinado sistema y las condiciones que pueden cambiarse (por ejemplo, temperatura, presión, etc.). Tiene la forma general

$$2 + C = F + P \text{ (cuando pueden variar la temperatura y la presión a la vez)} \quad (9-1)$$

Una forma mnemotécnica útil (que se pueda recordar con facilidad) de la regla de las fases de Gibbs es comenzar con un número, y seguir con los demás términos en orden alfabético (C , F y P), usando todos los signos positivos. En la regla de las fases, C es la cantidad de componentes "químicamente independientes", por lo general, elementos o compuestos, en el sistema; F es la cantidad de grados de libertad, o cantidad de variables (como temperatura, presión o composición) que pueden cambiar independientemente sin cambiar la cantidad de fases en equilibrio, y P es la cantidad presente de fases (no confundir P con "presión"). La constante "2" en la ecuación 9-1 implica que pueden cambiar tanto la temperatura como la presión. El término "químicamente independiente" se refiere a la cantidad de elementos o compuestos diferentes necesarios para especificar un sistema. Por ejemplo, se considera que el agua (H_2O) es un sistema de un componente, porque las concentraciones de H y O en el H_2O no se pueden variar en forma independiente.

Es importante observar que en la regla de las fases de Gibbs se supone que hay equilibrio termodinámico y que, normalmente, las condiciones de equilibrio durante el procesamiento de los materiales *no* se mantienen. En consecuencia, el lector no debe sorprenderse cuando vea que la cantidad y las composiciones de las fases que se ven en la práctica son muy distintas de las que indica la regla de las fases de Gibbs.

Otra cosa que debe notarse es que no siempre las fases tienen que ser las formas sólidas, líquidas y gaseosas de un material. Un elemento, como el hierro (Fe), puede existir en estructuras cristalinas FCC y BCC. Esas dos formas son dos fases distintas del hierro, que son estables a distintas condiciones de temperatura y presión. De igual modo, al referirnos al hielo, en sentido estricto, se debe definir una fase sólida determinada del hielo. El carbono puede existir en muchas formas, como el diamante o el grafito; éstas son sólo dos de las muchas fases posibles en el carbono.

Como ejemplo de la aplicación de la regla de las fases, veamos el caso del magnesio puro (Mg). La figura 9-2 muestra un diagrama de fases **unario** ($C = 1$) en el que las líneas dividen las fases sólida, líquida y gaseosa. El diagrama de fase unario también se llama diagrama presión-temperatura o **diagrama P-T**. En este diagrama, sólo hay un componente, que en este caso es magnesio (Mg). Sin embargo, dependiendo de la presión y la temperatura, puede haber dos o hasta tres *fases* presentes en determinado momento: magnesio sólido, magnesio líquido y vapor de magnesio. Obsérvese que la intersección de las líneas del diagrama de fases con la línea interrumpida que representa la presión de 1 atm define las temperaturas normales de fusión y ebullición del magnesio. A presiones muy bajas, un sólido como el magnesio (Mg) se puede *sublimar*, es decir, pasar en forma directa al estado gaseoso sin fundirse cuando se calienta.

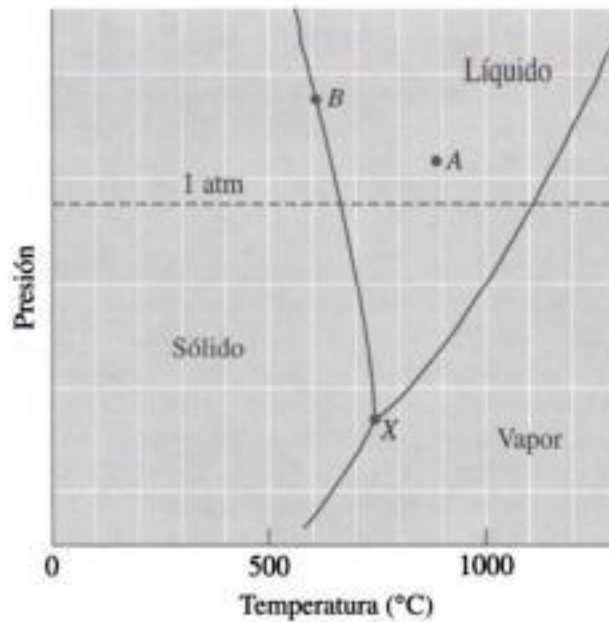


Figura 9-2 Esquema del diagrama de fase unaria para el magnesio, donde se muestran las temperaturas de fusión y de ebullición a una atmósfera de presión.

Supongamos que la presión y la temperatura son tales que definen al punto A en el diagrama de fases (Fig. 9-2). En ese punto, todo el magnesio es líquido. La cantidad de fases es una (líquido). La regla de las fases indica que hay dos grados de libertad. Según la ecuación 9-1:

$$2 + C = F + P, \text{ en consecuencia, } 2 + 1 = F + 1 \text{ (es decir, } F = 2\text{)}$$

¿Qué significa esto? Dentro de los límites, como se indica en el diagrama de la figura 9-2, se pueden cambiar la presión, la temperatura o ambas, y estar todavía en la parte de líquido total del diagrama. Dicho de otro modo, se debe fijar tanto la temperatura como la presión, para conocer con precisión que se está en la parte líquida del diagrama.

Examinemos el punto B, en la frontera entre las regiones sólida y líquida del diagrama. La cantidad de componentes, C, seguirá siendo uno, pero en el punto B coexisten el sólido y el líquido; es decir, la cantidad de fases P es dos. De acuerdo con la regla de las fases, en la ecuación 9-1,

$$2 + C = F + P, \text{ por consiguiente, } 2 + 1 = F + 2 \text{ (es decir, } F = 1\text{)}$$

o sólo hay un grado de libertad. Por ejemplo, si se cambia la temperatura, también se debe ajustar la presión para permanecer en el límite donde coexistan el líquido y el sólido. Por otra parte, si se fija la presión, el diagrama de fases indica la temperatura que debe haber para que existan sólido y líquido.

Por último, en el punto X coexisten el sólido, el líquido y el vapor. Si bien la cantidad de componentes sigue siendo uno, hay tres fases. La cantidad de grados de libertad es

$$2 + C = F + P, \text{ en consecuencia, } 2 + 1 = F + 3 \text{ (es decir, } F = 0\text{)}$$

En este caso no hay grados de libertad; todas las fases coexisten sólo si la temperatura y la presión están fijas a la vez. El punto del diagrama de fases en donde coexisten las fases sólida, líquida y gaseosa en condiciones de equilibrio es el **punto triple**. En los dos ejemplos siguientes veremos cómo se pueden aplicar algunas de las ideas basadas en la regla de las fases de Gibbs.

EJEMPLO 9-1**Diseño de un componente aeroespacial**

Como el magnesio (Mg) es un material de baja densidad ($\rho_{\text{Mg}} = 1.738 \text{ g/cm}^3$), se ha sugerido para un vehículo aeroespacial que tiene por objeto ingresar al ambiente del espacio exterior. ¿Es bueno este criterio?

SOLUCIÓN

En el espacio la presión es muy baja. Aun a temperaturas relativamente bajas, el magnesio sólido puede comenzar a transformarse en vapor, causando una pérdida de metal que podría dañar un vehículo espacial. Además, la radiación solar podría causar el calentamiento del vehículo, aumentando la rapidez de pérdida de magnesio.

Un metal de baja densidad con mayor punto de ebullición (y, en consecuencia, menor presión de vapor a cualquier temperatura) podría ser mejor elección. A la presión atmosférica, el aluminio hierve a 2494°C y el berilio (Be) hierve a 2770°C , en comparación con la temperatura de ebullición del magnesio, de 1107°C . Aunque el aluminio y el berilio son algo más densos que el magnesio, cualquiera de ellos sería una mejor opción de diseño. Dados los efectos tóxicos del Be y de muchos de sus compuestos en forma pulverizada, se debería considerar en primer lugar al aluminio.

Otros factores a considerar: en aplicaciones sujetas a cargas dinámicas no sólo se debería buscar la densidad, sino también la resistencia relativa. En consecuencia, la relación entre el módulo de Young y la densidad o entre la resistencia de cedencia y la densidad podría ser mejor parámetro para comparar diversos materiales. En esta comparación, podremos percatarnos de que, por ejemplo, la resistencia a la cedencia depende mucho de la microestructura, y el módulo de Young puede depender de las direcciones cristalográficas, porque la resistencia del aluminio se puede aumentar con aleaciones, manteniendo la densidad más o menos igual. Esto también es válido para los materiales compuestos a base de fibra de carbono.

Estos materiales pueden ser una buena elección. Otros factores, como la oxidación durante la entrada a la atmósfera terrestre se pueden aplicar y también deben tenerse en cuenta.

EJEMPLO 9-2**Síntesis de superconductores cerámicos con secado por congelación**

Muchos materiales cerámicos se preparan en polvo usando diferentes óxidos y carbonatos (capítulo 14). Esto se debe a que los cerámicos se funden a temperaturas muy altas y tienden a presentar comportamiento frágil. Por ejemplo, el proceso de síntesis del $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, cerámico superconductor llamado *YBCO*, implica mezclar y hacer reaccionar polvos de óxido de itrio (Y_2O_3), óxido de cobre (CuO) y carbonato de bario (BaCO_3). El carbonato de bario se descompone formando BaO durante las reacciones a alta temperatura, y reacciona con la itria y el óxido de cobre para formar distintas fases. Con frecuencia, este proceso, llamado técnica de "mezcla de óxido", produce polvos cerámicos relativamente gruesos. También se pueden formar otras fases indeseables, y pueden incorporarse al producto impurezas perjudiciales (debidas al procesamiento o a las materias primas). Por otra parte, las técnicas químicas que usan sustancias de gran pureza pueden ofrecer un producto mejor (lo más probable, a mayor costo). Uno de esos procesos químicos, que se usa en la industria alimenticia (por ejemplo, en preparación de café, especias, etc.) es el liofilizado o **secado por congelación**. [3] Un ejemplo de la utilización de este proceso es el café deshidratado, que consiste en extraer café de las semillas para evaporar entonces el agua mediante liofilizado o exposición a un secado por congelación.

Un ingeniero decide usar soluciones acuosas para desarrollar una síntesis del superconductor YBCO mediante secado por congelación. Usando el diagrama unario de fases del agua [Fig. 9-3(a)], explique los diversos pasos que podrían seguirse para obtener polvos químicamente homogéneos de alta pureza, del superconductor YBCO.

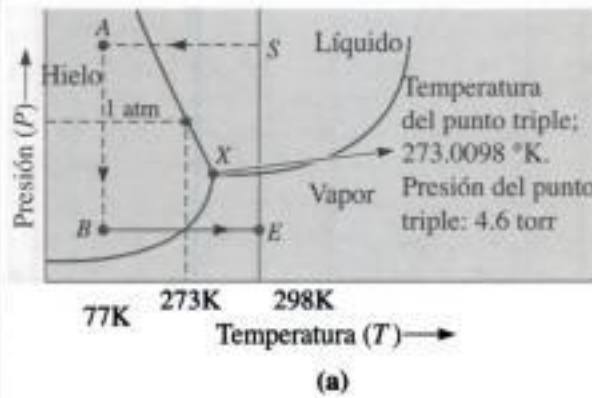
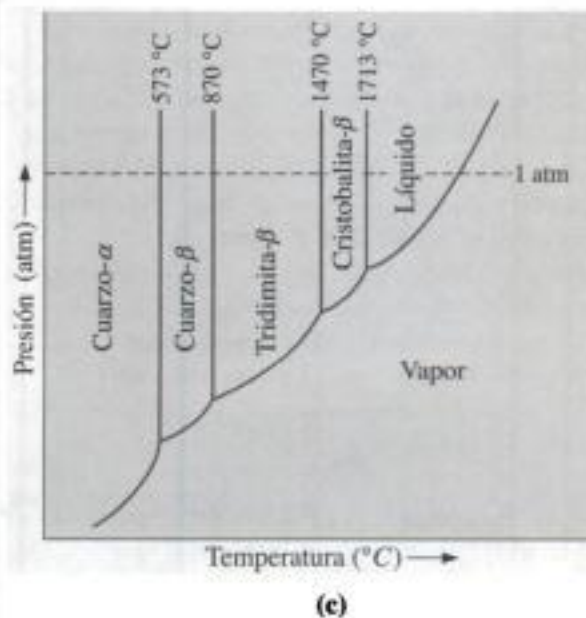
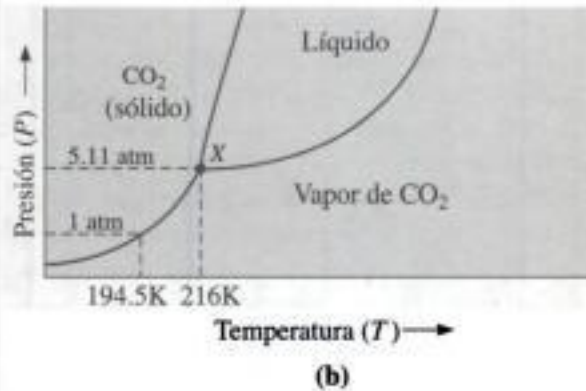


Figura 9-3
(a) Diagrama presión-temperatura para H_2O . La temperatura del punto triple es de 273.0098 K y la presión del punto triple es de 4.6 torr. Obsérvese la pendiente de la línea entre sólido y líquido que sube hacia la izquierda. A la presión normal (1 atm o 760 torr), la temperatura de fusión es de 273 K. Se muestra un posible esquema de secado por congelación comenzando en el punto S y continuando hacia la izquierda por la línea interrumpida. (b) Diagrama de presión-temperatura para el CO_2 . Muchos investigadores examinan las aplicaciones del CO_2 supercrítico como solvente en el procesamiento de plásticos y medicinas. (c) Diagrama presión-temperatura para SiO_2 . La línea interrumpida indica 1 atm de presión.



SOLUCIÓN

Ya que el agua es un medio en el cual se prepara el superconductor cerámico, se puede comenzar con las sustancias, llamadas precursores, del itrio, cobre y bario. Normalmente, los nitratos de muchos metales son hidrosolubles y trabajan bien.

Por consiguiente, podemos preparar una solución de nitratos de itrio, cobre y bario con la estequiometría adecuada de cationes. Tal vez debamos ajustar el pH de la solución para que todos los nitratos se disuelvan. Es un paso importante, porque aquí es donde se asegura que el polvo cerámico final es químicamente homogéneo. Una vez que tenemos una solución de nitratos metálicos mezclados a temperatura ambiente (298 K), podemos comenzar a bajar la temperatura o a iniciar el proceso de congelación. Sigamos las flechas de línea punteada de la figura 9-3(a) comenzando en el punto S. Podemos bajar la temperatura hasta unos 77 K usando nitrógeno líquido (punto A). Entonces estaremos en una región en donde el agua, el ácido nítrico y los nitratos disueltos están en estado sólido (llamado "hielo" en el diagrama). Ahora el truco es eliminar el ácido nítrico (HNO_3) y el agua sin causar fusión alguna. Esto se puede hacer bajando la presión aproximadamente hasta 10^{-2} torr (punto B). A continuación aumentamos la temperatura mientras mantenemos la baja presión, haciendo que el hielo y el ácido nítrico se sublimen (sólido $\rightarrow$ vapor). Quedará un polvo seco de nitratos metálicos mezclados al final del ciclo de liofilizado o secado por congelación (punto E). En este polvo el itrio, el cobre y el bario estarán mezclados a un nivel molecular.

El polvo de nitratos metálicos mezclados se calentará a continuación con cuidado (no se muestra en la figura 9-3(a)) y los nitratos se pueden descomponer para formar un polvo cerámico. Habrá que experimentar con este proceso, para establecer qué temperatura y cuánto tiempo se necesitarán para formar la fase superconductora deseada ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$). La estequiometría del oxígeno en el material dependerá de la atmósfera que se use durante la descomposición de los nitratos. Si esa descomposición se hace en aire, la estequiometría del oxígeno quedará determinada por la presión parcial del oxígeno en el aire. Debería bastar una temperatura aproximada entre 700 y 900 °C y un tiempo total aproximado de 2 horas a la temperatura seleccionada. En este proceso, se llevan a cabo reacciones en estado sólido entre los precursores finamente mezclados. Siempre hay una probabilidad de que otras fases existan, óxidos que, o bien, no sean superconductores o que se formen otras fases de óxidos. En consecuencia, habrá que optimizar el tratamiento térmico necesario para obtener la fase superconductora que interesa (es decir, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$). Se puede comprobar la formación de la fase superconductora de la estequiometría que se desea usando difracción de rayos X y otras técnicas como se describió en el capítulo 3.

En este ejemplo, ilustramos el uso del liofilizado o secado por congelamiento usando un diagrama de fases unario para el agua. No tuvimos en cuenta el efecto del ácido nítrico ni de los demás precursores en las regiones de fases; en la práctica, se deberá usar un diagrama P-T que incluya estos compuestos.

Examinemos con más detalle el diagrama de fases unario del agua. En la figura 9-3(a), obsérvese cómo la temperatura de fusión del hielo disminuye al aumentar la presión. Esto es excepcional. Se ha sugerido que una de las razones por las que los patinadores en hielo pueden deslizarse en él es que la presión de sus patines suele fundir el hielo, manteniendo así una capa de agua. Sin embargo, se ha demostrado que ése *no* es un factor importante. En cambio,

se ha demostrado que un fenómeno llamado "fusión superficial" del hielo es el factor principal en la formación de la película de agua lubricante que permite al patinador moverse con facilidad sobre el hielo.

La figura 9-3(b) muestra un diagrama P-T del dióxido de carbono (CO_2). En años recientes, ha habido gran interés en el uso del dióxido de carbono supercrítico como solvente en el procesamiento de algunos materiales, en especial de los plásticos.

La figura 9-3(c) muestra un diagrama de fases P-T de la sílice (SiO_2). [1] En él se pueden ver los diversos polimorfos de la sílice. En el capítulo 3, se explicó que los polimorfos son distintas estructuras cristalinas del mismo compuesto. En este diagrama, la forma estable de la sílice a temperatura ambiente es el cuarzo α . El cuarzo α se transforma en cuarzo β a 573°C . Al enfriarse, sucede la transformación inversa. Al calentar arriba de 870°C , se espera que el cuarzo β se transforme a tridimita β cambio que puede ser lento y, por ende, el cuarzo β puede continuar existiendo en lo que se llama **fase metaestable**. El cuarzo β metaestable puede pasar después a cristobalita β metaestable o a la sílice fundida.

Una fase metaestable es aquella que se encuentra en estado de equilibrio metaestable; normalmente, este equilibrio se puede aproximar usando sólo un procedimiento. [1] Los metales líquidos y el agua subenfriados son ejemplos de fases metaestables. Por ejemplo, se puede obtener agua líquida subenfriada, que es una fase metaestable del agua, enfriando agua desde la temperatura ambiente hasta una inferior a la normal de congelación de -0°C (capítulo 8). Sin embargo, no se puede calentar hielo y formar agua metaestable o subenfriada. Al enfriarse a partir de una temperatura alta, la sílice fundida forma vidrio. Obsérvese que el vidrio no aparece como fase en el diagrama de fases de la sílice [Fig. 9-3(c)], dado que un diagrama de fases sólo muestra fases en equilibrio. Cuando en forma científica o tecnológica se producen fases metaestables importantes, a veces éstas se muestran en los diagramas usando líneas punteadas.

9-2

Solubilidad y soluciones sólidas

Con frecuencia es bueno conocer cuánto de cada material o componente se puede combinar sin producir una fase adicional. Cuando comenzamos a combinar diversos componentes o materiales, como cuando se agregan elementos aleantes a un metal, se pueden formar soluciones sólidas o líquidas. Por ejemplo, cuando se agrega azúcar al agua, se forma una solución azucarada. Cuando se difunde una pequeña cantidad de átomos de fósforo (P) en silicio monocristal (Si), se produce una solución sólida de P en Si (capítulo 5). En otras palabras, estamos interesados en la **solubilidad** de un material en otro (por ejemplo, azúcar en agua, cobre en níquel, fósforo en silicio, etcétera).

Solubilidad ilimitada Supongamos que se comienza con un vaso de agua y un vaso de alcohol. El agua es una fase y el alcohol es una segunda fase. Si se vierte el agua en el alcohol y se agita, sólo se produce una fase [Fig. 9-1(b)]. El vaso contiene una solución de agua y alcohol con propiedades y composición únicas. El agua y el alcohol son solubles entre sí. Muestran **solubilidad ilimitada**. Independientemente de la relación de agua y alcohol sólo se produce una fase cuando se mezclan.

De igual forma, si mezcláramos cualquier cantidad de cobre y níquel líquidos, sólo se produciría una fase líquida. Esta aleación líquida tiene la misma composición y propiedades en todos sus puntos [Fig. 9-4(a)], porque el níquel y el cobre tienen solubilidad líquida ilimitada.

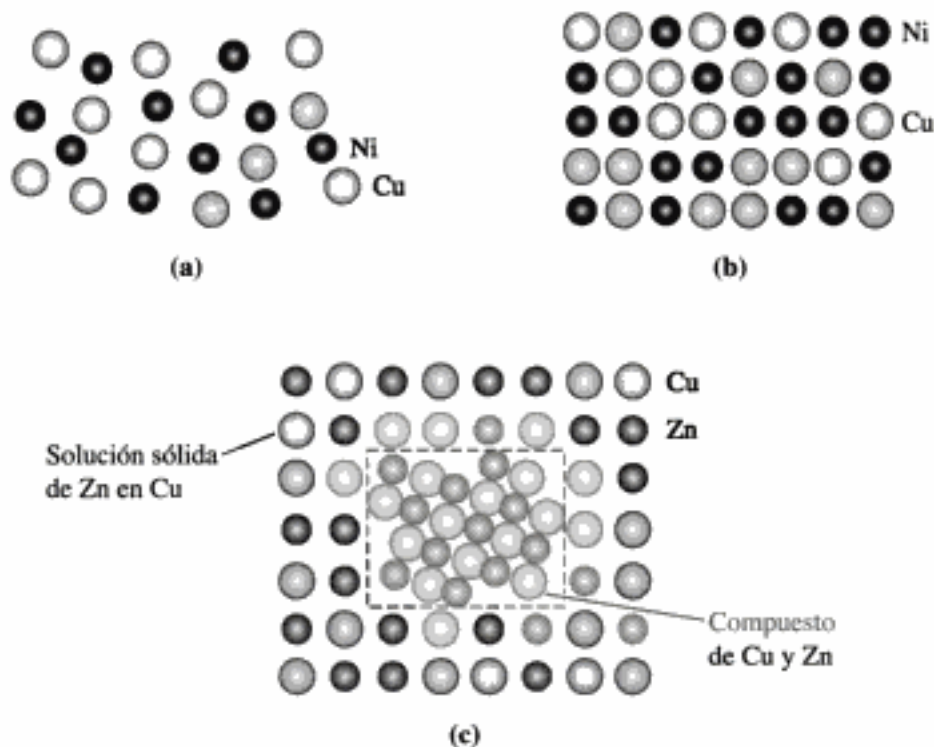


Figura 9-4 (a) El cobre y el níquel líquidos son totalmente solubles entre sí. (b) Las aleaciones sólidas de cobre y níquel tienen solubilidad completa, y los átomos de cobre y de níquel ocupan sitios aleatorios en la red. (c) En las aleaciones de cobre y zinc que contienen más de 30% de Zn, se forma una segunda fase por la solubilidad limitada del zinc en el cobre.

Si la aleación líquida de cobre y níquel se solidifica y se enfría a temperatura ambiente manteniendo equilibrio térmico, sólo se produce una fase sólida. Después de la solidificación, los átomos de cobre y níquel no se separan sino que se ubican al azar dentro de la estructura cristalina FCC. Dentro de la fase sólida, la estructura, propiedades y composición son uniformes y no existe interfaz entre los átomos de cobre y níquel. En consecuencia, el cobre y el níquel también tienen solubilidad sólida ilimitada. La fase sólida es una solución sólida de cobre y níquel [Fig. 9-4(b)].

Una solución sólida *no es* una mezcla. Una mezcla contiene más de una clase de fase cuyas características se mantienen cuando se forma la mezcla. En contraste, los componentes de una solución sólida se disuelven por completo entre sí y no retienen sus características individuales.

Otro ejemplo de un sistema que forma una solución sólida es el del titanato de bario (BaTiO_3) y el titanato de estroncio (SrTiO_3), los cuales son compuestos que se encuentran en el sistema ternario $\text{BaO-TiO}_2\text{-SrO}$. Examinemos las relaciones entre las fases de BaTiO_3 y SrTiO_3 . Si tomamos polvo de BaTiO_3 y comenzamos a agregarle polvo de SrTiO_3 , de hecho no sucede nada a temperatura ambiente, porque la difusión de los cationes es muy lenta. Los polvos sólo forman una mezcla mecánica. Sería difícil, pero no imposible, separar de nuevo los polvos. Sin embargo, si esta mezcla de polvos se calienta hasta una temperatura alta, como de 100°C , por ejemplo, y se recuece durante unas 24 horas, se formará una solución sólida de BaTiO_3 y SrTiO_3 . A esta solución sólida se le llama $(\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x})\text{TiO}_3$, donde x es la fracción mol de BaTiO_3 . En este material nuevo no se podrá separar una partícula de BaTiO_3 .

o una partícula de SrTiO_3 . Cada partícula de polvo de $(\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x})\text{TiO}_3$ tendrá iones Ba^{+2} , Sr^{+2} , Ti^{+4} y O^{-2} . Si el proceso se maneja en forma correcta, asegurándose de que los polvos se dispersen en forma homogénea y reaccionen totalmente, cada partícula tendrá una concentración uniforme de esos iones; es decir, si se seleccionan al azar diversas partículas, tendrán una composición química idéntica. La relación real de Ba^{+2} a Sr^{+2} dependerá, naturalmente, de cuánto BaTiO_3 y SrTiO_3 había al comenzar, es decir, de la fracción mol de BaTiO_3 . Se podrían producir diversas soluciones sólidas de distintas propiedades, cambiando la fracción mol de BaTiO_3 , x , de 0 a 1. Se usan soluciones sólidas de BaTiO_3 con SrTiO_3 y otros óxidos para fabricar componentes electrónicos como capacitores. Cada año se fabrican millones de capacitores con esos materiales (capítulo 18). En este caso, la ventaja de formar soluciones sólidas es que se pueden “sintonizar” las propiedades eléctricas de esos materiales, al igual que la estabilidad térmica de los componentes obtenidos. Las ferritas, que se usan en muchas aplicaciones parecidas, son materiales magnéticos que tienen estructuras cristalinas de espinel (capítulo 3). También se pueden sintonizar las propiedades magnéticas de muchas ferritas usando este método de solución sólida (capítulo 19).

Muchos semiconductores compuestos que tienen igual estructura cristalina forman con facilidad soluciones sólidas con 100% de solubilidad. Por ejemplo, se pueden formar soluciones sólidas de arseniuro de galio (GaAs) y arseniuro de aluminio (AlAs). La solución sólida se llama $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$, donde x es la fracción mol de Ga , y $1 - x$ es la fracción mol de As . Al cambiar x de 0 a 1, cambian las propiedades eléctricas de los semiconductores, como el ancho de banda, por ejemplo. Así, la formación de soluciones sólidas es una de las claves del ajuste del ancho de banda de diversos semiconductores. El ancho de banda se relaciona con el color de la luz emitida por un diodo fabricado con un semiconductor de ancho de banda directo. Examinaremos los semiconductores de ancho de banda directos e indirectos en el capítulo 18. La formación de soluciones sólidas en semiconductores como GaAs-AlAs , fosfuro de galio-fosfuro de indio (GaP-InP), etc., nos permite sintonizar el ancho de banda, haciendo posible así la fabricación de diodos emisores de luz (LEDs) de distintos colores, incluyendo ¡LED infrarrojos, invisibles al ojo! Los LED infrarrojos se usan en sistemas de comunicaciones de fibra óptica. Los LED rojos son los que más se usan en pantallas, y se fabrican con soluciones sólidas a base del sistema GaAs-GaP . Las soluciones sólidas se pueden formar usando más de dos compuestos o elementos.

Solubilidad limitada Cuando se agrega una cantidad pequeña de sal (una fase) a un vaso de agua (segunda fase) y se agita el conjunto, la sal se disuelve por completo en el agua. El sistema es monofásico: agua salada o salmuera. Sin embargo, si se agrega demasiada sal al agua, el exceso de sal baja al fondo del vaso [Fig. 9-1(c)]. En este caso, tenemos dos fases: el agua saturada con sal y el exceso de sal sólida. Encontramos que la sal tiene una **solubilidad limitada** en el agua.

Si agregamos una pequeña cantidad de zinc líquido a cobre líquido, se produce una sola solución líquida. Cuando esta solución de cobre y zinc se enfría y solidifica, resulta una sola solución sólida, con una estructura FCC, donde los átomos de cobre y zinc están ubicados al azar en puntos normales de red. Sin embargo, si la solución líquida contiene más que un 30% de Zn , algo del exceso de átomos de zinc se combinan con algunos de los átomos de cobre para formar un compuesto CuZn [Fig. 9-4(c)]. Ahora coexisten dos fases sólidas: una solución sólida de cobre saturada con un 30% de Zn , y el compuesto CuZn . La solubilidad del zinc en el cobre es limitada. La figura 9-5 muestra una parte del diagrama de fases Cu-Zn que ilustra la solubilidad del zinc en el cobre a bajas temperaturas. Esta solubilidad aumenta al aumentar la temperatura. Se parece a la forma en que se puede disolver más azúcar o sal en el agua por el incremento en la temperatura.

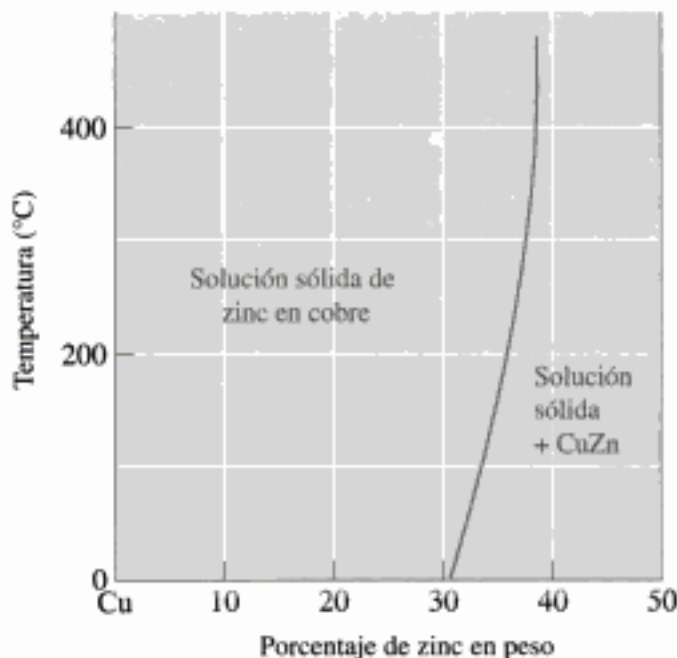


Figura 9-5
Solubilidad del zinc en el cobre. La línea continua representa el límite de solubilidad; cuando se agrega más zinc, se rebasa el límite de solubilidad y coexisten dos fases.

En el capítulo 5, examinamos cómo se puede preparar silicio (Si) dopado con fósforo (P), boro (B), arsénico (As), etc. Todos estos elementos dopantes tienen solubilidad limitada en Si; es decir, a pequeñas concentraciones forman una solución sólida en el Si. Así, las soluciones sólidas se producen aun cuando la solución sea limitada. No se necesita que haya 100% de solución sólida para formar soluciones sólidas. Obsérvese que las soluciones sólidas se pueden formar por mecanismos sustitucionales o intersticiales. Los átomos o iones huéspedes pueden ingresar a la estructura cristalina anfitriona en posiciones cristalográficas regulares o en los intersticios.

En el caso extremo, pudiera no existir prácticamente nada de solubilidad entre un material y otro. Esto es cierto para el aceite y el agua [Fig. 9-1 d)], o para aleaciones de cobre y plomo (Cu-Pb). Obsérvese que aunque los materiales no se disuelven uno dentro de otro, si pueden dispersarse uno en otro. Por ejemplo, las fases aceitosas y los líquidos acuosos pueden mezclarse utilizando surfactantes para tomar emulsiones. La inmiscibilidad o falta de solubilidad se aprecia en muchos materiales fundidos, cerámicos sólidos y metales.

Sistemas poliméricos Los materiales poliméricos se pueden procesar para aumentar su utilidad, con un concepto parecido a la formación de soluciones sólidas en sistemas metálicos y cerámicos. Se pueden formar materiales llamados **copolímeros**, formados por distintos monómeros. Por ejemplo, los monómeros de acrilonitrilo (A), butadieno (B) y estireno (S, de "stirene") pueden hacerse reaccionar y formar un copolímero llamado ABS. Este copolímero resultante se parece a una solución sólida porque tiene las funcionalidades de los tres monómeros de los que se deriva, y sus propiedades se mezclan. En forma parecida a las soluciones sólidas de Cu-Ni o $\text{BaTiO}_3\text{-SrTiO}_3$, no se podrán separar el acrilonitrilo, el butadieno o el estireno en un plástico ABS. Para convertir el ABS en teléfonos, caretas, volantes de dirección y pequeñas cajas y gabinetes de aparatos electrodomésticos, se usa el moldeo por inyección. La figura 9-6 ilustra las propiedades de diversos copolímeros en el sistema ABS.[4] Obsérvese que éste *no* es un diagrama de fases. Otro ejemplo de copolímero es el Dylark™, el cual se forma utilizando anhídrido maleico y un monómero de estireno.[5] El Dylark™ recubierto con negro de humo para protegerlo contra radiación UV, reforzado con fibra de vidrio y fortalecido con hule, se usa para fabricar paneles en muchos automóviles (capítulo 15).

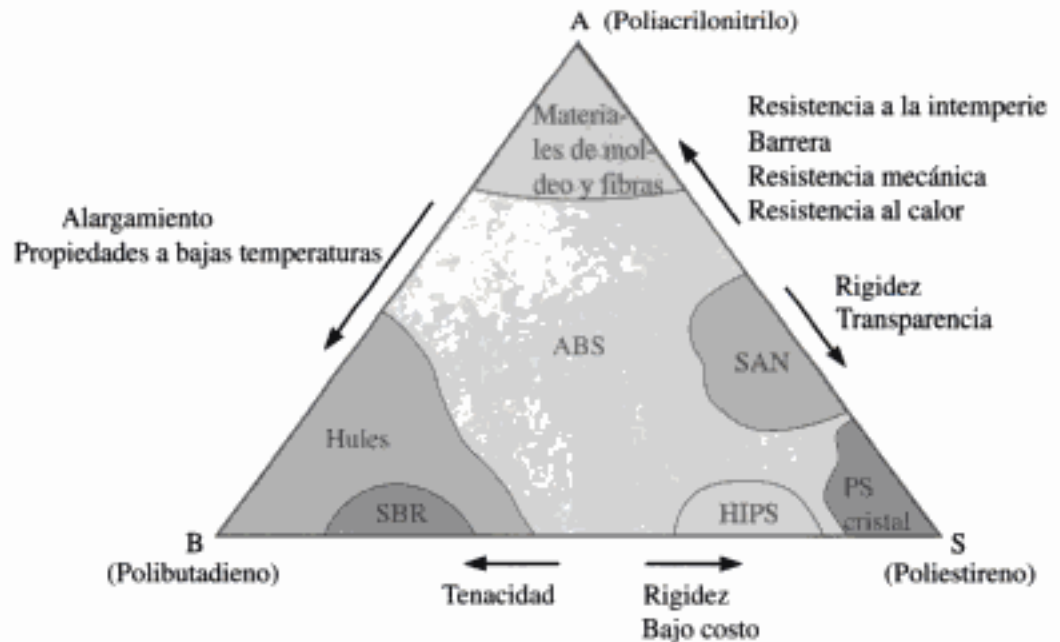


Figura 9-6 Diagrama de las variaciones en las propiedades de copolímeros del sistema ABS. No es un diagrama de fases. (Fuente: de *Plastics, Materials and Processing*, 2a. ed., por B.A. Strong, p. 223, fig. 6-14. Copyright © 2000, Prentice Hall. Reimpreso con autorización de Pearson Education.)

9-3

Condiciones para la solubilidad ilimitada

Para que un sistema de aleación, como el de cobre-níquel, tenga solubilidad sólida ilimitada, debe satisfacer ciertas condiciones conocidas como las **reglas de Hume-Rothery**; que son las siguientes:

1. **Factor tamaño:** los átomos o los iones deben tener tamaño semejante, con una diferencia de radio atómico no mayor al 15%, para minimizar la deformación de la red, es decir, minimizar, a nivel atómico, las desviaciones causadas en las distancias interatómicas.
2. **Estructura cristalina:** los materiales deben tener la misma estructura cristalina; de lo contrario, se llegará a un punto en el que se presenta una transición de una fase a otra con una estructura distinta.
3. **Valencia:** los iones deben tener la misma valencia; de no ser así, la diferencia de electrones de valencia impulsa la formación de compuestos, no de soluciones.
4. **Electronegatividad:** los átomos deben tener más o menos la misma electronegatividad. La electronegatividad es la afinidad hacia los electrones (capítulo 2). Si las electronegatividades son apreciablemente distintas, se forman compuestos, como cuando los iones sodio y cloro se combinan y forman cloruro de sodio.

Las condiciones de Hume-Rothery deben cumplirse, pero no necesariamente son suficientes para que dos metales (por ejemplo, Cu y Ni) o dos compuestos (por ejemplo, BaTiO_3 - SrTiO_3) tengan solubilidad ilimitada.

La figura 9-7 muestra en forma esquemática las estructuras bidimensionales del MgO y NiO . Los iones Mg^{+2} y Ni^{+2} tienen tamaño y valencia similares y, en consecuencia, pueden reemplazarse mutuamente en una estructura cristalina de cloruro de sodio (NaCl) (capítulo 3),

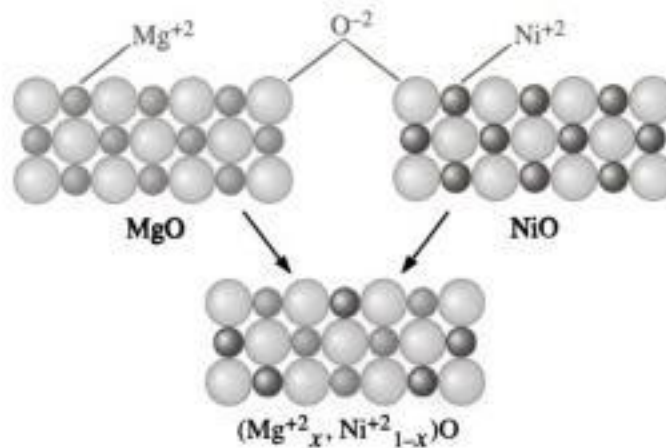


Figura 9-7 El MgO y el NiO tienen estructuras cristalinas, radios iónicos y valencias similares; por tanto, los dos materiales cerámicos pueden formar soluciones sólidas.

formando una serie completa de soluciones sólidas de la forma $(\text{Mg}^{+2}_x\text{Ni}^{+2}_{1-x})\text{O}$, donde x = fracción mol de Mg^{+2} o de MgO.

La solubilidad de los átomos intersticiales siempre es limitada. Los átomos intersticiales son mucho más pequeños que los del elemento anfitrión, y con ello violan la primera de las condiciones de Hume-Rothery.

EJEMPLO 9-3

Soluciones cerámicas sólidas del MgO

Se puede agregar NiO al MgO para producir una solución sólida. ¿Qué otros sistemas cerámicos presentan posiblemente una solubilidad sólida de 100% en MgO?

SOLUCIÓN

En este caso, debemos considerar aditivos de óxido que tengan cationes metálicos con la misma valencia y radio iónico que los cationes magnesio. La valencia del ion magnesio es +2 y su radio iónico es 0.66 Å. Del apéndice B, algunas otras posibilidades en las que el catión tiene una valencia de +2 incluyen las siguientes:

	r (Å)	$\left[\frac{r_{\text{an}} - r_{\text{Mg}^{+2}}}{r_{\text{Mg}^{+2}}} \right] \times 100\%$	Estructura de Cristal
Cd^{+2} en CdO	$r_{\text{Cd}^{+2}} = 0.97$	47	NaCl
Ca^{+2} en CaO	$r_{\text{Ca}^{+2}} = 0.99$	50	NaCl
Co^{+2} en CoO	$r_{\text{Co}^{+2}} = 0.72$	9	NaCl
Fe^{+2} en FeO	$r_{\text{Fe}^{+2}} = 0.74$	12	NaCl
Sr^{+2} en SrO	$r_{\text{Sr}^{+2}} = 1.12$	70	NaCl
Zn^{+2} en ZnO	$r_{\text{Zn}^{+2}} = 0.74$	12	NaCl

También se muestra la diferencia porcentual de radios iónicos y estructura cristalina, y sugiere que el sistema FeO-MgO muestre posiblemente solubilidad sólida ilimitada. También los sistemas CoO y ZnO tienen las relaciones de radios y las estructuras cristalinas adecuadas.

En los materiales metálicos, uno de los efectos importantes de la formación de soluciones sólidas es el **endurecimiento por solución sólida** resultante. Este endurecimiento, por la formación de la solución sólida, lo causa la mayor resistencia al movimiento de dislocaciones. Es una de las razones importantes de por qué el latón (aleación de Cu-Zn) es más resistente que el cobre puro. Después veremos que el carbono también desempeña otro papel en el reforzamiento de los aceros, por la formación de carburo de hierro (Fe_3C) y otras fases (capítulo 11). Podrían hacerse artículos de joyería con oro y plata puros; sin embargo, ambos metales son extremadamente blandos y maleables, y esos artículos no conservarían su forma. Es también la razón por la que los joyeros agregan cobre al oro o a la plata.

En el sistema cobre-níquel (Cu-Ni), se introduce en forma intencional un átomo sustitucional (níquel) en la estructura cristalina original (del cobre). La aleación de cobre y níquel es más resistente que el cobre puro. De igual modo, si se agrega menos de 30% de Zn al cobre, el zinc se comporta como átomo sustitucional que fortalece la aleación de cobre y zinc, en comparación con el cobre puro.

Recuérdese que en el capítulo 6 se dijo que la resistencia de los cerámicos queda determinada principalmente por la distribución de las imperfecciones; la formación de solución sólida no tiene un gran efecto sobre las propiedades mecánicas. Esto se parece a la forma en que el endurecimiento por deformación no tiene mucha importancia en el aumento de la resistencia de los cerámicos o de los semiconductores como el silicio (capítulo 7). Como se explicó antes, la formación de soluciones sólidas en los cerámicos y los semiconductores (como Si, GaAs, etc.) tiene una influencia considerable sobre sus propiedades magnéticas, ópticas

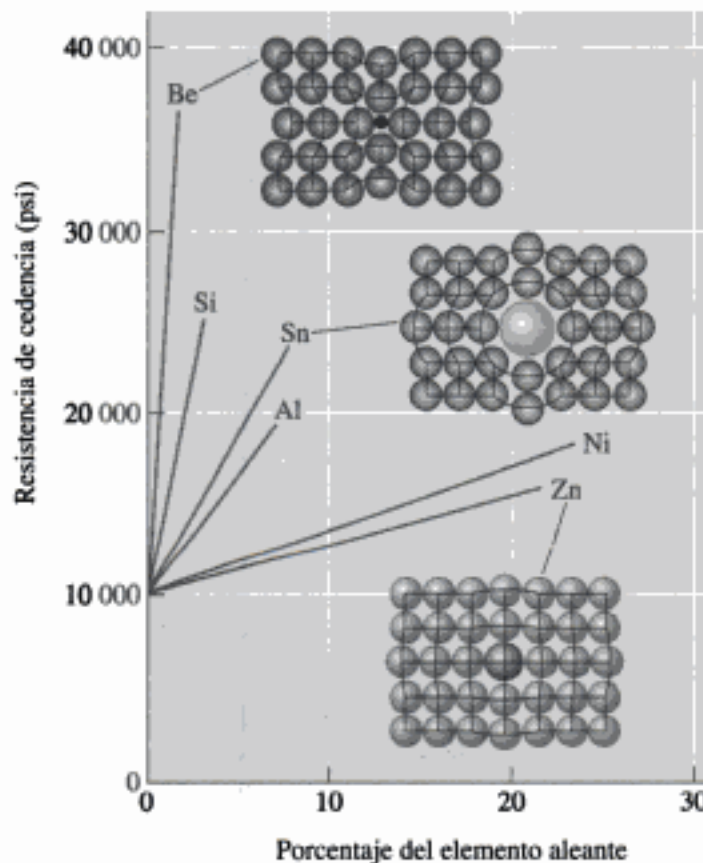


Figura 9-8 Efectos de varios elementos aleantes sobre la resistencia del cobre a la cedencia. Los átomos de níquel y de zinc tienen más o menos el mismo tamaño que los de cobre, pero los átomos de berilio y de estaño son muy diferentes de los átomos de cobre. Al aumentar la diferencia de tamaños atómicos y la cantidad de elemento aleante, aumenta el endurecimiento por solución sólida.

y dieléctricas. Por tanto, la siguiente explicación relacionada con las propiedades mecánicas se aplica principalmente a los materiales metálicos.

Grado de reforzamiento por solución sólida El grado de reforzamiento por solución sólida depende de dos factores. El primero es que una gran diferencia en los radios atómicos entre el solvente (anfitrión) y el soluto (huésped o aleante) aumenta el efecto de reforzamiento. Una mayor diferencia de tamaños produce mayor perturbación de la estructura cristalina inicial, dificultando el deslizamiento (Fig. 9-8).

El segundo es que una mayor cantidad de elemento de aleación que se agregue producirá un mayor efecto de reforzamiento (Fig. 9-8). Una aleación de Cu con 20% de Ni es más resistente que una con 10% de Ni. Naturalmente, si se agrega demasiada cantidad de átomos grandes o pequeños, se rebasará el límite de solubilidad y se producirá un mecanismo distinto de reforzamiento: el **endurecimiento por dispersión de segundas fases**. En este mecanismo, la interfaz entre la fase anfitriona y la fase huésped resiste el movimiento de las dislocaciones y contribuye al endurecimiento. Este mecanismo se describirá más detalladamente en el capítulo 10.

EJEMPLO 9-4

Endurecimiento por solución sólida

A partir de los radios atómicos, indique si la diferencia de tamaño entre los átomos de cobre y los del aleante predice bien la cantidad de reforzamiento que se encuentra en la figura 9-8.

SOLUCIÓN

Los radios atómicos y la diferencia porcentual de tamaños se muestran a continuación:

Metal	Radio atómico (Å)	$\left[\frac{r - r_{\text{Cu}}}{r_{\text{Cu}}} \right] \times 100\%$
Cu	1.278	0
Zn	1.332	+4.2
Al	1.432	+12.1
Sn	1.509	+18.1
Ni	1.243	-2.7
Si	1.176	-8.6
Be	1.143	-10.6

Para los átomos de mayor tamaño al del cobre, que son zinc, aluminio y estaño, el aumento de la diferencia en el tamaño aumenta el efecto del reforzamiento. De igual modo, para los átomos de menor tamaño, al aumentar la diferencia de tamaños aumenta el reforzamiento.

Efecto del reforzamiento por solución sólida sobre las propiedades Los efectos del reforzamiento por solución sólida sobre las propiedades de un material metálico incluyen las siguientes (Fig. 9-9):

1. La resistencia de cedencia, resistencia a la tensión y dureza de la aleación son mayores que las de los metales puros. Es una de las razones por la que las aleaciones se usan con más frecuencia, en lugar de los metales puros. Por ejemplo, se agregan pequeñas concentraciones de Mg al aluminio para obtener mayor resistencia en las aleaciones que se usan en la manufactura de latas de aluminio para bebidas.[6]

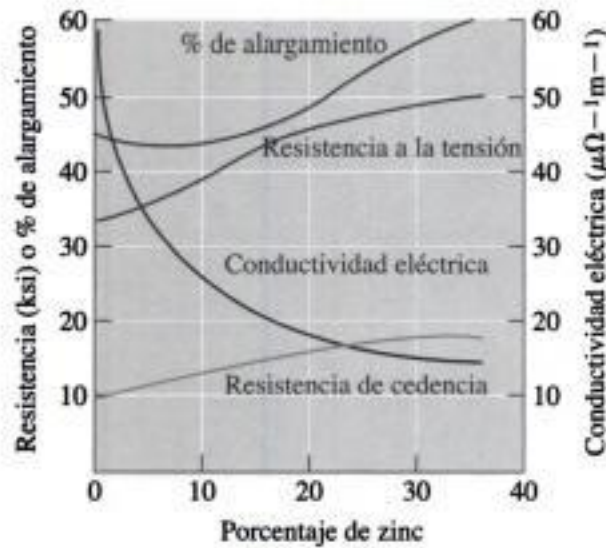


Figura 9-9
Efecto de adiciones de zinc al cobre, sobre las propiedades de la aleación endurecida por solución. El aumento de % de alargamiento al aumentar el contenido de zinc no es característico del endurecimiento por solución sólida.

2. Casi siempre, la ductilidad de la aleación es menor que la del metal puro. Sólo rara vez, como en las aleaciones de cobre y zinc, el fortalecimiento por solución sólida aumenta la resistencia y la ductilidad al mismo tiempo.
3. La conductividad eléctrica de la aleación es mucho menor que la del metal puro (capítulo 18). Esto se debe a que los electrones se dispersan a mayor distancia de los átomos de los elementos aleantes. No se recomienda el reforzamiento por solución sólida de los alambres de cobre o de aluminio que se usan en la transmisión de la energía eléctrica, debido a este efecto tan pronunciado. La conductividad eléctrica de muchas aleaciones, aunque es menor que la de los metales puros, frecuentemente es más estable en función de la temperatura.
4. La resistencia a la termofluencia, o pérdida de resistencia a temperaturas elevadas, mejora con el reforzamiento por solución sólida. Las altas temperaturas no causan un cambio catastrófico en las propiedades de las aleaciones endurecidas por solución sólida. Muchas aleaciones para temperaturas elevadas, como las que se usan en los motores de propulsión a chorro, se basan en parte en el reforzamiento amplio por solución sólida.

9-5

Diagramas de fases isomorfo

Un diagrama de fases muestra las fases y sus composiciones en cualquier temperatura y composición de la aleación. Cuando en un material están presentes sólo dos elementos o dos compuestos, se puede trazar un **diagrama de fases binario**. Los **diagramas de fases isomorfos binario** se encuentran en varios sistemas metálicos y cerámicos. En los sistemas isomorfos, que incluyen los sistemas cobre-níquel y NiO-MgO [Fig. 9-10(a) y (b)], sólo se forma una fase sólida; los dos componentes en el sistema muestran una solubilidad sólida completa. Como se muestra en los diagramas de fase para los sistemas $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ -SrO $\cdot$ SiO_2 y de talio-plomo (Tl-Pb), es posible tener diagramas de fases que muestran un punto mínimo o máximo, respectivamente [Fig. 9-10(c) y (d)].[1] Obsérvese que la escala del eje x puede representar % mol o % en peso de uno de los componentes. También se puede graficar % atómico o fracción mol de uno de los componentes. Obsérvese también que el diagrama CaO-SiO_2 y SrO-SiO_2 se podría haber graficado como **diagrama de fases ternario**. Un diagrama de fases ternario es para sistemas que están constituidos por tres componentes. En este caso, se representa como

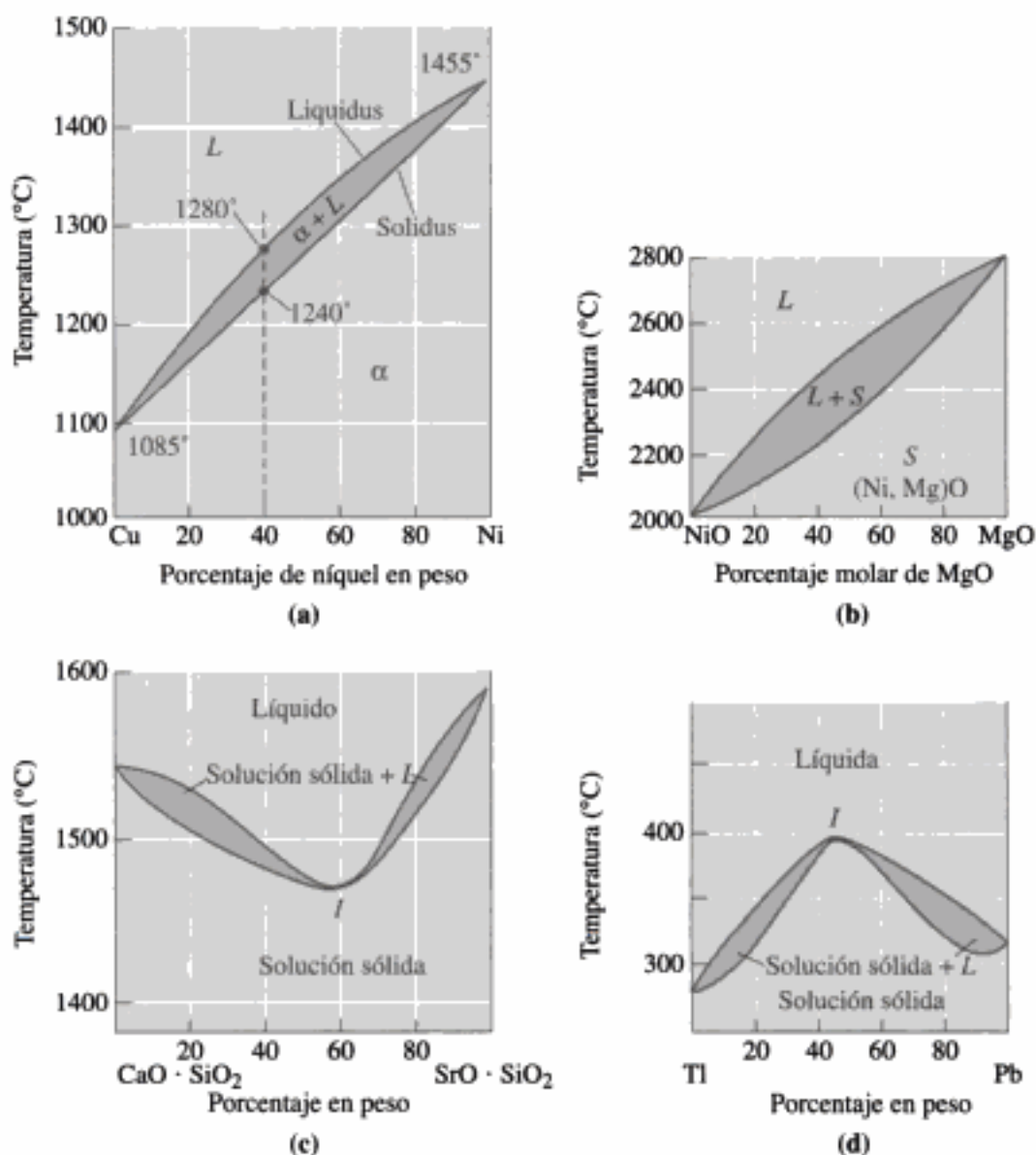


Figura 9-10 (a) Diagramas de fases en equilibrio para los sistemas Cu-Ni y NiO-MgO. (b) Se muestran las temperaturas liquidus y solidus para una aleación de Cu-40% Ni. (c) y (d) Sistemas con máximos y mínimos de solución sólida. (Fuente: adaptado de *Introduction to Phase Equilibria*, por C.G. Bergeron y S.H. Risbud. Copyright © 1984, American Ceramic Society. Reproducido con autorización.)

un **diagrama pseudobinario** (es decir, se supone que es un diagrama que representa el equilibrio de fases entre $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ y $\text{SrO} \cdot \text{SiO}_2$). En un diagrama pseudobinario, se representan los equilibrios entre tres o más componentes usando dos compuestos. Con frecuencia, se encuentran diagramas de fases ternarios en los sistemas cerámicos y metálicos.[1,5]

Más recientemente, también ha habido grandes avances en el desarrollo de diagramas de fases usando bases de datos de computación que contienen propiedades termodinámicas de diversos elementos y compuestos. Con interfaces gráficas, es posible generar diagramas de fase para composiciones relativamente complejas. Un ejemplo de un programa comercial desarrollado con este fin es el de Thermocalc™. Estas herramientas de programación pueden ser eficientes.

Sin embargo, se necesita un conocimiento considerable con los materiales y un adiestramiento con el programa. Algunas sociedades profesionales, como la American Ceramic Society y la American Society of Metals, también han publicado valiosas y extensas colecciones de diagramas de fases para distintos sistemas metálicos y cerámicos.[6,7] Algunas de esas colecciones se pueden obtener en CD-ROM, en las bibliotecas.

Hay información valiosa que se puede obtener en los diagramas de fase, como sigue:

Temperaturas liquidus y solidus La **temperatura liquidus o de líquido** se define como aquella arriba de la cual un material es totalmente líquido. La curva superior de la figura 9-10(a) representa las temperaturas de líquidos para las aleaciones cobre-níquel de distintas composiciones. Se debe calentar una aleación cobre-níquel arriba de la temperatura de líquido para producir una aleación totalmente líquida que a continuación pueda colarse y producir una forma útil. La aleación líquida comienza a solidificarse cuando la temperatura baja hasta la temperatura de líquido. Para la aleación de Cu con 40% de Ni de la figura 9-10(a), la temperatura de líquido es de 1280 °C.

La **temperatura solidus o de sólido**, para las aleaciones de cobre-níquel, es aquella por debajo de la cual esa aleación es 100% sólida. La curva inferior de la figura 9-10(a) representa las temperaturas de sólido para las aleaciones Cu-Ni de distintas composiciones. Una aleación de cobre y níquel no es totalmente sólida sino hasta que el material se enfría debajo de la temperatura de sólido. Si se usa una aleación de cobre-níquel a alta temperatura, se debe tener cuidado en que la temperatura de servicio sea menor que la de sólido, para que no haya fusión. Para la aleación de Cu-40% Ni de la figura 9-10(a), la temperatura de sólido es de 1240 °C.

Las aleaciones cobre-níquel se funden y solidifican dentro de un intervalo de temperaturas entre las de líquido y sólido. La diferencia de temperaturas entre la de líquido y la de sólido es el **intervalo de solidificación** de la aleación. Dentro de ese intervalo, coexisten dos fases: líquida y sólida. El sólido es una solución de átomos de cobre y níquel, y se llama fase α . Para la aleación Cu-40% Ni (fase α) en la figura 9-10(a), el intervalo de congelación es $1280 - 1240 = 40$ °C. Obsérvese que los metales puros se solidifican a una temperatura fija, es decir, el intervalo de solidificación es cero.

Fases presentes Frecuentemente estamos interesados en saber qué fases están presentes en una aleación a determinada temperatura. Si planeamos hacer una pieza colada, debemos estar seguros de que el metal esté líquido al principio; si queremos dar tratamiento térmico a un componente de aleación, debemos asegurarnos de que no se forme líquido durante el proceso. Las distintas fases sólidas tienen distintas propiedades. Por ejemplo, el Fe BCC (que se indica como fase α en el diagrama de fases hierro-carbono) es magnético. Sin embargo, el hierro FCC (que se indica como fase γ en el diagrama Fe-C) no lo es. Aprenderemos más acerca de la ferroelectricidad en capítulos posteriores. Veremos que la fase tetragonal del titanato de bario (BaTiO_3) es ferroeléctrica, pero la fase cúbica del BaTiO_3 no lo es (capítulo 18).

Se puede considerar que el diagrama de fases es un mapa de carreteras; si se saben las coordenadas —la temperatura y la composición de la aleación— se pueden determinar las fases presentes, suponiendo que existe equilibrio termodinámico. Hay muchos ejemplos de casos de importancia tecnológica en los que no queremos formar fases en equilibrio. Por ejemplo, en la formación del vidrio de silicato, lo que deseamos obtener es un vidrio amorfo, y no una forma de SiO_2 cristalina. Al endurecer los aceros templándolos desde una temperatura alta, el endurecimiento se debe a la formación de fases fuera de equilibrio. En esos casos, los diagramas de fases no proporcionan toda la información necesaria; entonces, necesitamos usar diagramas especiales que tengan en cuenta el efecto del tiempo (es decir, la cinética) sobre las transformaciones de fases. Examinaremos el uso de esos diagramas en capítulos posteriores.

Los dos siguientes ejemplos ilustran las aplicaciones de algunos de esos conceptos.

EJEMPLO 9-5**Sistema isomorfo NiO-MgO**

A partir del diagrama de fases del sistema binario NiO-MgO [Fig. 9-10(b)], describa una composición que pueda fundirse a 2600 °C, pero que no se funda al ponerla en servicio a 2300 °C.

SOLUCIÓN

El material debe tener una temperatura liquidus inferior a 2600 °C, pero la temperatura solidus mayor que 2300 °C. El diagrama de fases NiO-MgO [Fig. 9-10(b)] permite indicar una composición adecuada.

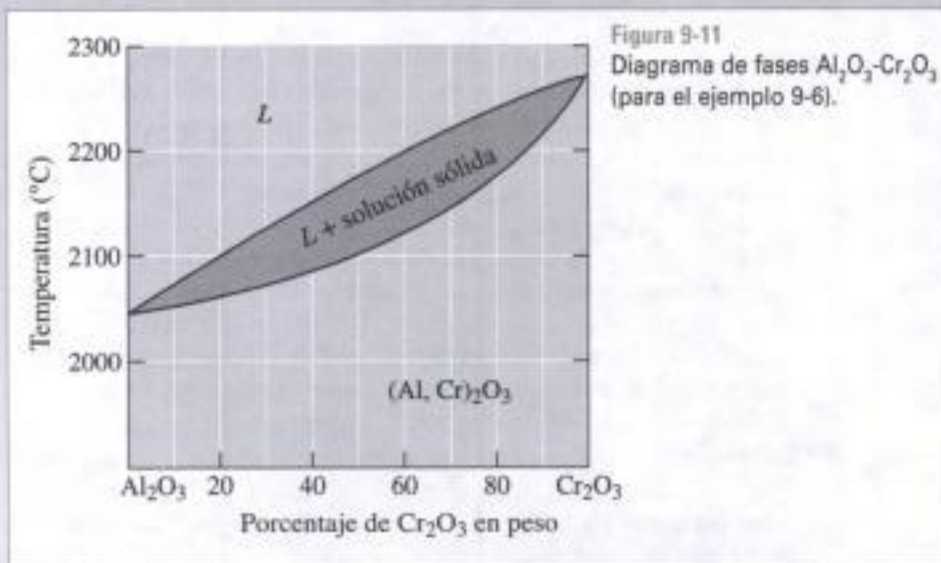
Para identificar una composición con temperatura liquidus menor que 2600 °C, debe contener menos de 65% mol de MgO en el refractario. Para identificar una composición con temperatura solidus mayor que 2300 °C, debe contener al menos 50% mol de MgO. En consecuencia, se puede usar cualquier composición entre 50% mol de MgO y 65% mol de MgO.

EJEMPLO 9-6**Diseño de un material compuesto**

Un método para mejorar la tenacidad a la fractura de un material cerámico (capítulo 6) es reforzar la matriz de cerámica con fibras de cerámica. Un diseñador de materiales ha sugerido que se puede reforzar el Al_2O_3 con 25% de fibras de Cr_2O_3 , que interfieran con la propagación de grietas en la alúmina. El material compuesto debe funcionar bajo carga a 2000 °C durante varios meses. Haga una crítica de este diseño.

SOLUCIÓN

Ya que el material compuesto funcionará a altas temperaturas durante un tiempo considerable, las dos fases: las fibras de Cr_2O_3 y la matriz de Al_2O_3 , no deben reaccionar entre sí. Además, el material compuesto debe permanecer sólido cuando menos hasta 2000 °C. El diagrama de fases de la figura 9-11 permite evaluar esta elección del material compuesto.



El Cr_2O_3 puro, el Al_2O_3 puro y el Al_2O_3 -25% Cr_2O_3 tienen temperaturas solidus mayores que 2000 °C. En consecuencia, no hay peligro de fusión de alguno de los componentes. Sin embargo, el Cr_2O_3 y el Al_2O_3 tienen solubilidad sólida ilimitada. A la alta temperatura de servicio de 2000 °C, los iones Al^{3+} se difundirán de la matriz hacia la fibra, reemplazando los iones Cr^{3+} en ella. Simultáneamente, los iones Cr^{3+} reemplazarán a los Al^{3+} en la matriz. Mucho antes de que pasen varios meses, esos procesos de difusión harán que las fibras se disuelvan por completo en la matriz. Si ya no quedan fibras, la tenacidad a la fractura será baja de nuevo.

Composición de cada fase Para cada fase, se puede especificar una composición, expresada como porcentaje de cada elemento en ella. Lo usual es que la composición se exprese en porcentaje de peso (% en peso). Cuando sólo está presente una fase en la aleación, o en una solución sólida cerámica, la composición de la fase es igual a la composición general del material. Si la composición original de una aleación o un material cerámico en una fase cambia, también debe cambiar la composición de la fase.

Sin embargo, cuando coexisten dos fases, como líquido y sólido, por ejemplo, sus composiciones son distintas entre sí, y también difieren de la composición general del material. En este caso, si esa composición cambia un poco, la composición de las dos fases no se afecta, siempre y cuando la temperatura permanezca constante.

Esta diferencia se explica con la regla de las fases de Gibbs. En este caso, a diferencia del ejemplo del magnesio puro (Mg) que describimos antes, se mantiene fija la presión en una atmósfera, lo normal para los diagramas de fases binarios. La regla de las fases, de acuerdo con la ecuación 9-1, se puede reformular como sigue:

$$1 + C = F + P \quad (\text{para presión constante}), \quad (9-2)$$

donde C es nuevamente la cantidad de componentes químicos independientes, P es la cantidad de fases (*no es la presión*) y F es la cantidad de grados de libertad. Ahora usamos el número 1 en vez del 2, porque la presión se mantiene constante. Esto reduce en 1 la cantidad de grados de libertad. La presión, normalmente, es una atmósfera, aunque no necesariamente siempre. En un sistema binario, la cantidad de componentes C es dos; entre los grados de libertad que tenemos están el cambio de temperatura y el cambio de la composición de las fases presentes. Esta forma de la regla de fases puede aplicarse al sistema Cu-Ni, como se muestra en el ejemplo 9-7.

EJEMPLO 9-7

Regla de fases para el diagrama de fases isomorfo

Determine los grados de libertad en una aleación de Cu-40% Ni: a) a 1300 °C, b) a 1250 °C y c) a 1200 °C.

SOLUCIÓN

Éste es un sistema binario ($C = 2$): los dos componentes son Cu y Ni. Se supondrá constante la presión. En este caso, la ecuación 9-2 ($1 + C = F + P$) se puede usar como sigue:

a) a 1300 °C, $P = 1$, ya que sólo hay una fase (líquida) presente; $C = 2$, porque están presentes átomos de cobre y de níquel. Entonces:

$$1 + C = F + P \quad \text{así que} \quad 1 + 2 = F + 1; \text{ es decir } F = 2$$

Se deben fijar la temperatura y la composición de la fase líquida para describir por completo el estado de la aleación cobre-níquel en la región líquida.

b) A 1250°C , $P = 2$, porque hay líquido y sólido presentes; $C = 2$, porque hay presentes átomos de cobre y de níquel. Entonces:

$$1 + C = F + P \quad \text{así que} \quad 1 + 2 = F + 2; \text{ es decir } F = 1$$

Si se fija la temperatura en la región de dos fases, también queda fija la composición de esas fases. O también, si se fija la composición de una fase, se fijan en forma automática la temperatura y la composición de la segunda fase.

c) A 1200°C , $P = 1$, porque sólo hay una fase, la sólida; $C = 2$, porque están presentes átomos tanto de cobre como de níquel. De nuevo,

$$1 + C = F + P \quad \text{así que} \quad 1 + 2 = F + 1; \text{ es decir } F = 2$$

y se deben fijar la temperatura y la composición para describir por completo el estado del sólido.

Como sólo hay un grado de libertad en una región de dos fases de un diagrama binario, las composiciones de las dos fases siempre están fijas cuando se especifica la temperatura. Esto es válido aun cuando cambie la composición general de la aleación. En consecuencia, se puede usar una línea de enlace, o isoterma, para determinar la composición de las dos fases. Una **línea de enlace o isoterma** es una línea horizontal en una región de dos fases, que se traza a la temperatura de interés (Fig. 9-12). En un sistema isomorfo, la línea de enlace une los puntos de las curvas liquidus y solidus a la temperatura especificada. Los extremos de esa línea representan las composiciones de las dos fases en equilibrio. En regiones de una fase no se usan líneas de enlace, porque no hay dos fases que se puedan "enlazar" con dicha línea.

Para toda aleación de composición general que esté entre c_L y c_S , la composición del líquido es c_L y la del sólido α es c_S .

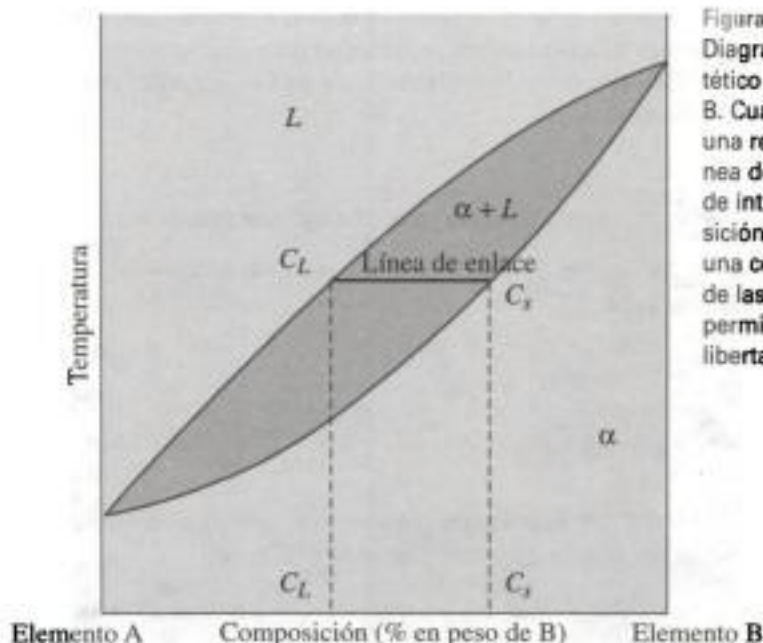


Figura 9-12
Diagrama de fases binario hipotético entre dos elementos, A y B. Cuando una aleación está en una región de dos fases, una línea de enlace a la temperatura de interés determina la composición de las dos fases. Esto es una consecuencia de la regla de las fases de Gibbs, que sólo permite que haya un grado de libertad.

El siguiente ejemplo ilustra cómo se usa el concepto de línea de enlace para determinar la composición de diferentes fases en equilibrio.

EJEMPLO 9-8

Composición de las fases en el diagrama de fases Cu-Ni

Determine la composición de cada fase en una aleación de Cu-40% Ni a 1300 °C, 1270 °C, 1250 °C y 1200 °C. (Véase la Fig. 9-13.)

SOLUCIÓN

La línea vertical en 40% Ni representa la composición general de la aleación.

- **1300 °C:** Sólo hay líquido. El líquido debe contener 40% de Ni, como la composición general de la aleación.
- **1270 °C:** Hay dos fases. Se traza una línea horizontal dentro del campo de $\alpha + L$. El extremo en la línea liquidus, que toca a la región del líquido, tiene 37% de Ni. El extremo en la línea solidus, que está en contacto con la región α , indica 50% de Ni. En consecuencia, el líquido contiene 37% de Ni y el sólido contiene 50% de Ni.
- **1250 °C:** De nuevo hay dos fases. La línea de enlace trazada a esta temperatura indica que el líquido contiene 32% de Ni y que el sólido contiene 45% de Ni.
- **1200 °C:** Sólo hay sólido α , por lo que el sólido debe contener 40% de Ni.

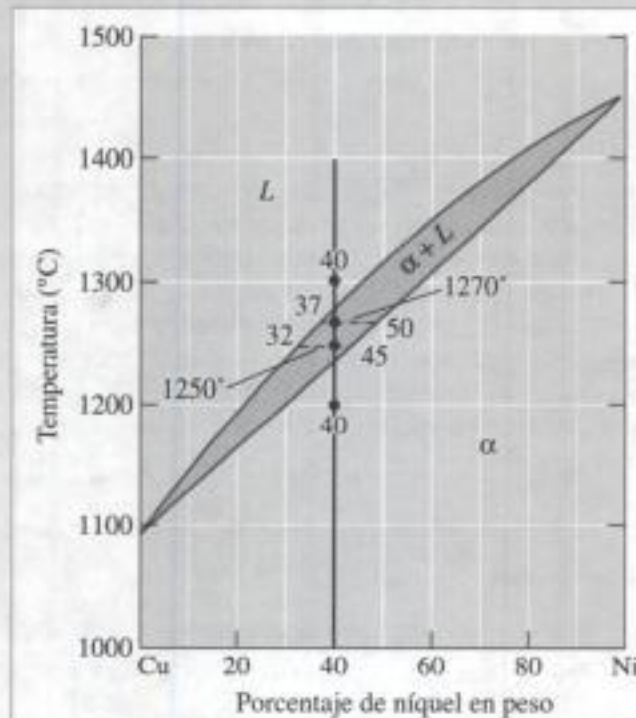


Figura 9-13 Líneas de enlace y composiciones de fase para una aleación de Cu-40% Ni a varias temperaturas (para el ejemplo 9-8).

En el ejemplo 9-8 encontramos que el sólido α contiene más níquel que la aleación en general y que el líquido L contiene más cobre que la aleación original. En términos generales, el elemento de mayor punto de fusión (en este caso níquel) se concentra en el primer sólido que se forma.

Cantidad de cada fase (la regla de la palanca) Por último, estamos interesados en las cantidades relativas de cada fase presentes en la aleación. Esas cantidades se suelen expresar como porcentaje en peso (% en peso). Expresaremos las cantidades absolutas de distintas fases en unidades de masa o de peso (gramos, kilogramos, etc.). El siguiente ejemplo ilustra la lógica de la **regla de la palanca**.

EJEMPLO 9-9**Aplicación de la regla de la palanca**

Calcule las cantidades de fases α y L a 1250°C , en la aleación de Cu-40% Ni que se muestra en la figura 9-14.

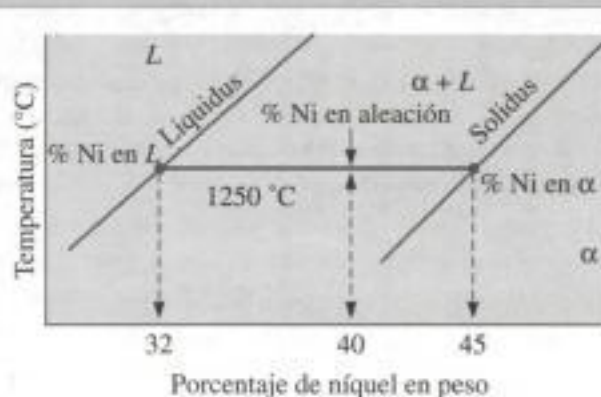


Figura 9-14

Línea de enlace a 1250°C en el sistema cobre-níquel; se usa en el ejemplo 9-9 para determinar la cantidad de cada fase.

SOLUCIÓN

Digamos que x = fracción másica de la aleación que es sólido α . Como sólo hay dos fases, el resto del níquel debe estar en la fase líquida (L). Así, la fracción másica de níquel en el líquido será $1 - x$. Consideremos 100 gramos de la aleación. Esta aleación consistirá en 40 gramos de níquel a todas las temperaturas. A 1250°C se puede plantear una ecuación que represente el balance de masa para el níquel. A esa temperatura, tenemos x gramos de la fase alfa (sólido), y $100(1 - x)$ gramos de líquido.

Masa total de níquel en 100 gramos de la aleación = masa de níquel en el líquido + masa de níquel en α .

$$\therefore 100 \times (\% \text{Ni en aleación}) = [(100)(1 - x)] (\% \text{Ni en } L) + (100) [x] (\% \text{Ni en } \alpha)$$

$$\therefore (\% \text{Ni en aleación}) = (\% \text{Ni en } L) (1 - x) + (\% \text{Ni en } \alpha) (x)$$

Multiplicando y reordenando,

$$x = \frac{(\% \text{Ni en la aleación}) - (\% \text{Ni en } L)}{(\% \text{Ni en } \alpha) - (\% \text{Ni en } L)}$$

De acuerdo con el diagrama de fases a 1250°C :

$$x = \frac{40 - 32}{45 - 32} = \frac{8}{13} = 0.62$$

Si convertimos la fracción a porcentaje de masa, la aleación contiene 62% de α y 38% de L a 1250°C . Obsérvese que la concentración de Ni en la fase alfa (a 1250°C) es 45%, y en la fase líquida (a 1250°C) es 32%.

Para calcular las cantidades de líquido y sólido se forma una palanca con la línea de enlace, con el punto de apoyo en la composición original de la aleación. El brazo de palanca *opuesto* a la composición de la fase, cuya cantidad se está calculando, se divide entre la longitud total de la palanca, para obtener la cantidad de esa fase. En el ejemplo 9-9 el denominador representa la longitud total de la línea de enlace y el numerador es la porción de la palanca *opuesta* a la composición del sólido que se está analizando.

En general, la regla de la palanca se puede enunciar como:

$$\text{Porcentaje de fase} = \frac{\text{brazo de palanca opuesto}}{\text{longitud total de la línea de enlace}} \times 100 \quad (9-3)$$

Se puede aplicar la regla de la palanca en cualquier región de dos fases de un diagrama de fases binario. No se aplica en regiones de una sola fase, porque el resultado es trivial (hay 100% de esa fase). La regla de la palanca es para calcular la fracción relativa o % de una fase en una mezcla de dos fases. Los extremos de la línea de enlace que se usan indican la composición (es decir, la concentración química de los distintos componentes) de cada fase.

El siguiente ejemplo es para reforzar la aplicación de la regla de la palanca en el cálculo de las cantidades de fases para una aleación a distintas temperaturas. Es una forma de seguir el comportamiento de las aleaciones en la solidificación, algo que no vimos en el capítulo 8.

EJEMPLO 9-10 Solidificación de una aleación de Cu con 40% de Ni

Determine la cantidad de cada fase en la aleación de Cu-40% Ni que se muestra en la figura 9-13 a 1300 °C, 1270 °C, 1250 °C y 1200 °C.

SOLUCIÓN

* 1300 °C: Sólo hay una fase, por lo que es 100% *L*.

$$* 1270\text{ °C: } \%L = \frac{50 - 40}{50 - 37} \times 100 = 77\%$$

$$\% \alpha = \frac{40 - 37}{50 - 37} \times 100 = 23\%$$

$$* 1250\text{ °C: } \%L = \frac{45 - 40}{45 - 32} \times 100 = 38\%$$

$$\% \alpha = \frac{40 - 32}{45 - 32} \times 100 = 62\%$$

* 1200 °C: Sólo hay una fase, por lo que es 100% α .

Obsérvese que a cada temperatura se le puede determinar la composición de las fases en equilibrio con los extremos de la línea de enlace trazada a esa temperatura.

Al principio, lo anterior puede parecer un poco raro. ¿Cómo cambia su composición la fase α ? La fase líquida también cambia su composición, y varían las cantidades de cada fase con la temperatura, a medida que la aleación se enfría desde el liquidus hasta el solidus.

A veces deseamos expresar la composición como porcentaje atómico (% at) y no como porcentaje en peso (% en peso). Para una aleación Cu-Ni, en la que M_{Cu} y M_{Ni} son los pesos moleculares, las siguientes ecuaciones son ejemplos de cómo se hacen esas conversiones:

$$\% \text{ atómico de Ni} = \left(\frac{(\text{at}\% \text{ Ni})/(M_{\text{Ni}})}{(\text{at}\% \text{ Ni})/(M_{\text{Ni}}) + (\text{at}\% \text{ Cu})/(M_{\text{Cu}})} \right) \times 100 \quad (9-4)$$

$$\% \text{ en peso de Ni} = \left(\frac{\left[\frac{\text{wt}\% \text{ Ni}}{M_{\text{Ni}}} \right]}{\left[\frac{\text{wt}\% \text{ Ni}}{M_{\text{Ni}}} + \frac{\text{wt}\% \text{ Cu}}{M_{\text{Cu}}} \right]} \right) \times 100 \quad (9-5)$$

9-6

Relación entre las propiedades y el diagrama de fases

Ya mencionamos que una aleación de cobre y níquel es más resistente que el cobre puro o el níquel puro, a causa del endurecimiento por solución sólida. Las propiedades mecánicas de una serie de aleaciones de cobre-níquel se pueden relacionar con el diagrama de fases, como se muestra en la figura 9-15.

La resistencia del cobre aumenta debido al endurecimiento por solución sólida hasta que se le agrega un 60% de Ni. El níquel puro se endurece al agregarle cobre hasta un 40%. La resistencia máxima se obtiene con una aleación de níquel con 60% de cobre, que se

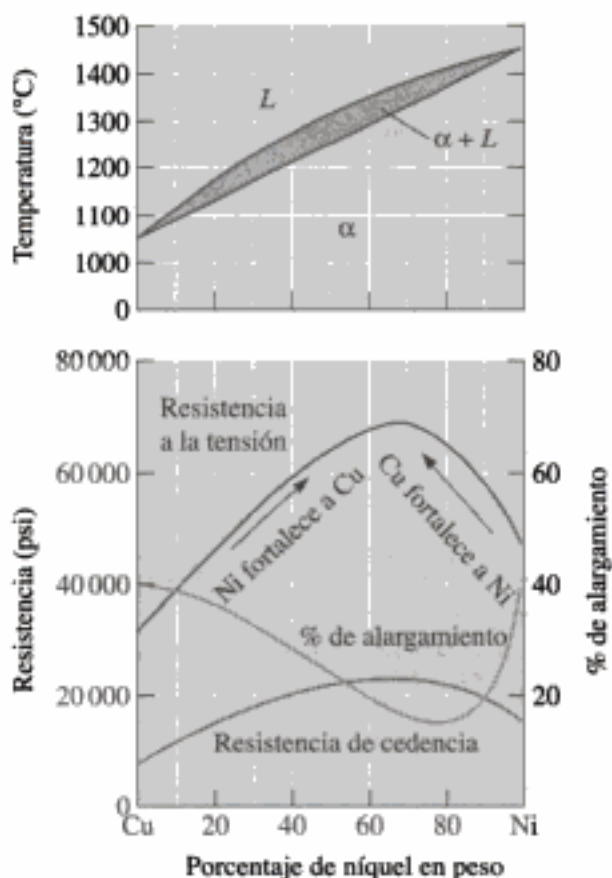


Figura 9-15

Propiedades mecánicas de las aleaciones cobre-níquel. El cobre se endurece hasta agregarle el 60% de Ni, y el níquel se endurece hasta el 40% de Cu.

llama *Monel*. El máximo se acerca más al lado del níquel puro en el diagrama de fases, porque el níquel puro es más resistente que el cobre puro.

EJEMPLO 9-11

Diseño de un procedimiento de fusión para una fundición

Se necesita producir una aleación de Cu-Ni que tenga una resistencia mínima de cedencia de 20 000 psi, resistencia mínima a la tensión de 60 000 psi y 20% de alargamiento mínimo. En el almacén se encuentra una aleación de Cu con 20% de Ni y también hay níquel puro. Diseñe un método para producir piezas fundidas que tengan las propiedades requeridas.

SOLUCIÓN

En la figura 9-15 determinamos la composición necesaria de la aleación. Para cumplir con la resistencia de cedencia, debe contener entre 30 y 90% de Ni; para la resistencia a la tensión, se requiere de 33 a 90% de Ni. El porcentaje de alargamiento requerido se puede obtener con aleaciones que contengan menos de 60% o más de 90% de Ni. Para satisfacer todas estas condiciones, podríamos usar:

$$\text{Cu-90\% Ni} \quad \text{o} \quad \text{Cu-33\% a 60\% de Ni}$$

Preferimos seleccionar un contenido de níquel bajo, ya que el níquel es más costoso que el cobre. Además, las aleaciones con menores contenidos de níquel tienen menor temperatura líquida y permiten obtener piezas con menos gasto de energía. Por lo anterior, una aleación razonable podría ser Cu-35% Ni.

Para obtener esta composición a partir de las existencias disponibles, debemos mezclar algo del níquel puro con los lingotes de Cu-20% Ni. Supongamos que se desea producir 10 kg de la aleación. Sea x la masa de la aleación Cu-20% Ni que se necesita. La masa de Ni puro necesario será $10 - x$.

Como la aleación final contiene 35% de Ni, la masa total de Ni agregado será:

$$(10 \text{ kg}) \left(\frac{35\% \text{ Ni}}{100\%} \right) = 3.5 \text{ kg Ni}$$

Ahora se planteará un balance de masa para el níquel. El níquel de la aleación Cu-20% + el níquel puro agregado = níquel total en la aleación de 35% que se va a producir.

$$\begin{aligned} (x \text{ kg}) \left(\frac{20\%}{100\%} \right) + (10 - x \text{ kg Ni}) \left(\frac{100\%}{100\%} \right) &= 3.5 \text{ kg Ni} \\ 0.2x + 10 - x &= 3.5 \\ 6.5 &= 0.8x \\ x &= 8.125 \text{ kg} \end{aligned}$$

Por consiguiente, necesitamos fundir 8.125 kg de Cu-20% Ni con 1.875 kg de níquel puro para producir la aleación requerida. Calentaríamos la mezcla por arriba de la temperatura de líquida, que es de 1250 °C para la aleación de Cu-35% Ni, antes de vaciar el metal líquido en el molde.

Debemos hacer esos cálculos en muchas situaciones prácticas relacionadas con el procesamiento de aleaciones, porque cuando se fabrican esos materiales se usan materias primas nuevas y recicladas.

9-7

Solidificación de aleaciones de solución sólida

Cuando se funde y se enfría una aleación como la de Cu-40% Ni, la solidificación requiere tanto nucleación como crecimiento. La nucleación heterogénea permite poco o ningún subenfriamiento, por lo que se inicia cuando el líquido llega a la temperatura liquidus (capítulo 8). El diagrama de fases (Fig. 9-16), con una línea de enlace trazada a la temperatura liquidus, indica que el *primer sólido que se forma* tiene una composición Cu-52% Ni.

Para el crecimiento del sólido α deben cumplirse dos condiciones. La primera es que el crecimiento necesita eliminar el calor latente de fusión (ΔH_f), que se desprende cuando se solidifica el líquido, a través de la interfaz sólido-líquido. En segundo lugar, a diferencia de los metales puros, debe efectuarse la difusión para que las composiciones de las fases sólida y líquida sigan las curvas de solidus y liquidus durante el enfriamiento. El calor latente de fusión (ΔH_f) se elimina en un intervalo de temperaturas tal que la curva de enfriamiento presenta un cambio de pendiente, y no una meseta plana (Fig. 9-17). Así, como mencionamos en el capítulo 8, la solidificación de las aleaciones es distinta de la de los metales puros.

Al inicio de la solidificación, el líquido contiene Cu-40% Ni, y el primer sólido contiene Cu-52% Ni. Los átomos de níquel deben haberse difundido hacia, y concentrado en, el primer sólido que se forma. Pero después de enfriarse a 1250 °C, la solidificación ha avanzado y el diagrama de fases indica que ahora todo el líquido debe contener 32% de Ni, y que todo el

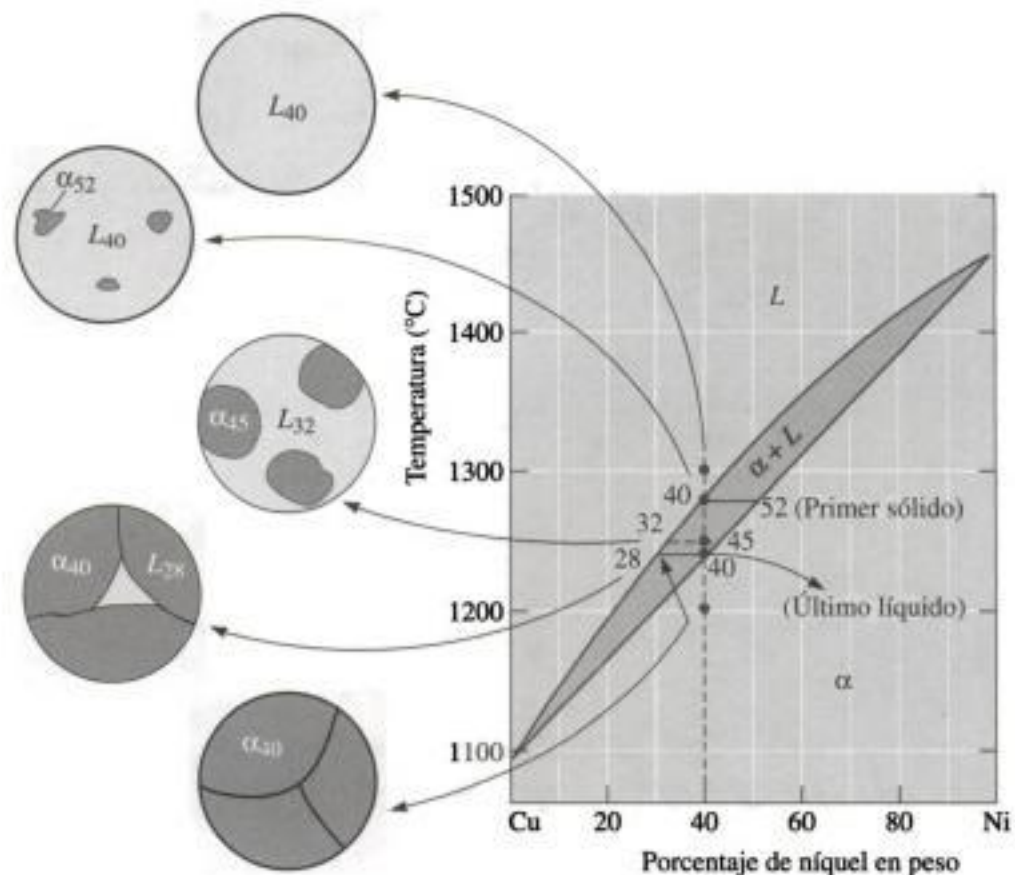


Figura 9-16 Cambio de la estructura de una aleación de Cu con 40% de Ni durante su solidificación en equilibrio. Se deben difundir los átomos de níquel y de cobre durante el enfriamiento para satisfacer el diagrama de fases y producir una estructura uniforme en equilibrio.

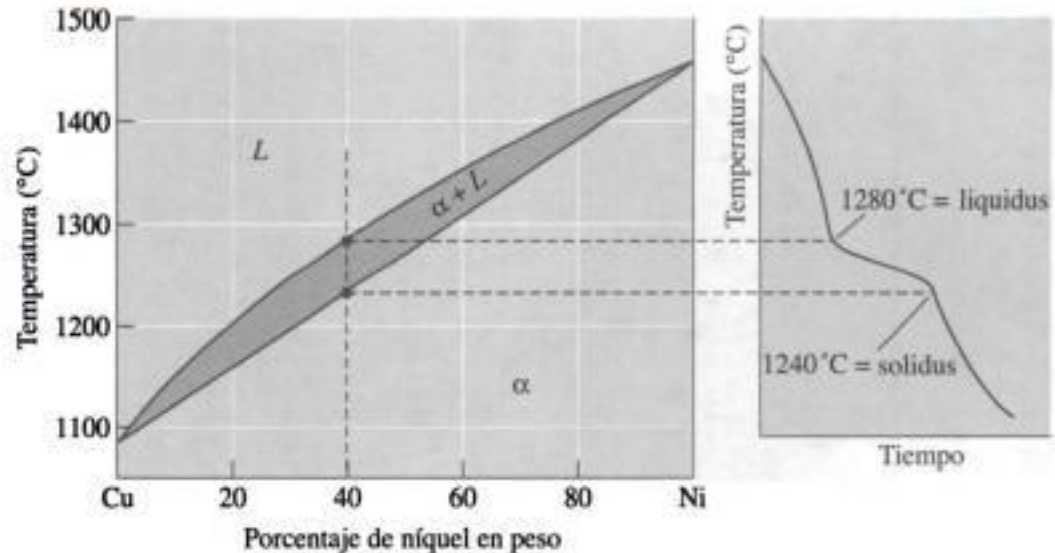


Figura 9-17 Curva de enfriamiento de una aleación isomorfa durante su solidificación. Se supone que las velocidades de enfriamiento son pequeñas y que permiten el establecimiento de equilibrio térmico. Los cambios en la pendiente de la curva de enfriamiento marcan las temperaturas liquidus y solidus; en este caso, es para una aleación de Cu-40% Ni.

sólido debe contener 45% de Ni. Al enfriar desde el liquidus hasta 1250 °C, algunos átomos de níquel deben difundirse desde el primer sólido hasta el nuevo, reduciendo el níquel en el primer sólido. Otros átomos de níquel se difunden desde el líquido que se solidifica hacia el nuevo sólido. Mientras tanto, los átomos de cobre se han concentrado, por difusión, en el líquido restante. Este proceso debe continuar hasta llegar a la temperatura solidus, donde el último líquido en solidificarse, que contiene Cu-28% Ni, se solidifica y forma el sólido con Cu-40% Ni. Justo abajo de la temperatura solidus, todo el sólido debe contener una concentración uniforme de 40% de Ni.

Para alcanzar esta estructura final de equilibrio, la velocidad de enfriamiento debe ser extremadamente pequeña. Se debe dar el tiempo suficiente para que se difundan los átomos de cobre y níquel y produzcan las composiciones que indica el diagrama de fases. En muchas situaciones prácticas de fundición, la velocidad de enfriamiento es muy alta y no permite alcanzar el equilibrio. Por ello, en la mayoría de las piezas fundidas de aleaciones se espera que haya segregación química. Ya vimos en el capítulo 8 que la porosidad es un defecto que puede presentarse en muchos productos fundidos. Otro defecto que se presenta con frecuencia es el de la **segregación** química, que se describirá con detalle en la siguiente sección.

9-8

Solidificación fuera de equilibrio y segregación

En el capítulo 5 examinamos las fuerzas termodinámicas y cinéticas impulsoras de la difusión. Sabemos que la difusión es más rápida en los gases; después, en los líquidos y, por último, en los sólidos. También explicamos que al aumentar la temperatura mejoran las velocidades de difusión. Cuando el enfriamiento es demasiado rápido para que los átomos se difundan y se produzcan condiciones de equilibrio, se producen estructuras fuera de equilibrio o desequilibrio en la pieza fundida. Veamos lo que sucede con nuestra aleación de Cu-40% Ni al enfriarla con rapidez.

De nuevo, el primer sólido que se forma contiene 52% de Ni, al llegar a la temperatura liquidus (Fig. 9-18). Al enfriarse a 1260 °C, la línea de enlace indica que el líquido contiene

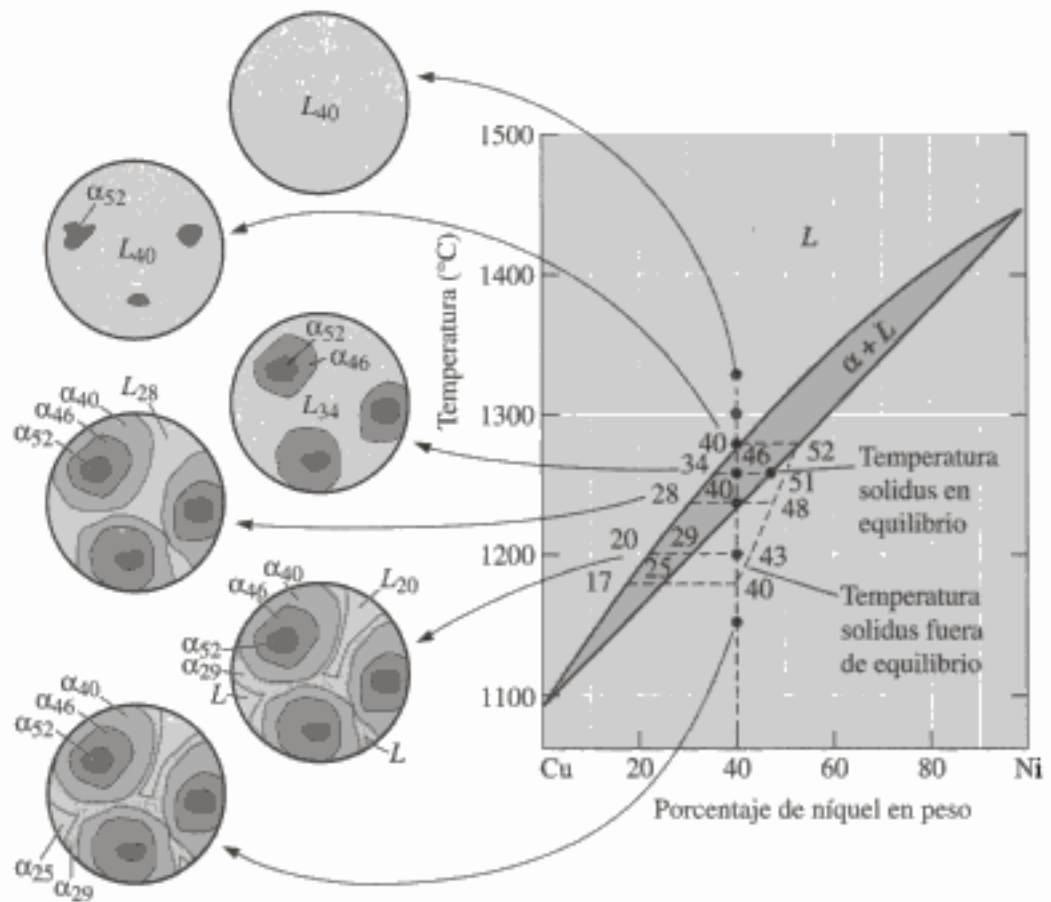


Figura 9-18 Cambio de estructura de una aleación de Cu-40% Ni durante solidificación fuera de equilibrio. Si es insuficiente el tiempo para que haya difusión en el sólido, se produce una estructura segregada.

34% de Ni, y el sólido que se forma a esa temperatura contiene 46% de Ni. Como la difusión tiene lugar con rapidez en los líquidos, es de esperarse que la línea de enlace indique con exactitud la composición del líquido. Sin embargo, en los sólidos la difusión es comparativamente lenta. El primer sólido que se forma seguirá teniendo un 52% de Ni, pero el nuevo sólido contiene sólo 46% de Ni. Podríamos encontrar que la composición promedio del sólido es 51% de Ni. Esto indica una línea solidus fuera de equilibrio distinto del que indica el diagrama de fases. Al continuar la solidificación, la línea solidus fuera de equilibrio continúa separándose de la solidus de equilibrio.

Cuando la temperatura llega a 1240 °C (la temperatura solidus de equilibrio), queda una cantidad apreciable de líquido. El líquido no se solidifica por completo sino hasta haberse enfriado a 1180 °C, donde la temperatura solidus fuera de equilibrio cruza la composición original de 40% de Ni. A esa temperatura, se solidifica el líquido que contiene 17% de Ni, y el último sólido en formarse contiene 25% de Ni. La composición promedio del sólido es de 40% de Ni, pero no es uniforme.

El lugar real de la línea solidus fuera de equilibrio y la temperatura final de solidus fuera de equilibrio dependen de la velocidad de enfriamiento: velocidades de enfriamiento mayores causan desviaciones del equilibrio más grandes. En el siguiente ejemplo se ilustra cómo pueden tenerse en cuenta los cambios de composición bajo condiciones fuera de equilibrio.

EJEMPLO 9-12 Solidificación de aleaciones de Cu-Ni fuera de equilibrio

Calcule la composición y la cantidad de cada fase en una aleación de Cu-40% Ni presentes bajo las condiciones fuera de equilibrio que se muestran en la figura 9-18, a 1300, 1280, 1260, 1240, 1200 y 1150 °C. Compare con las composiciones y cantidades de cada fase bajo condiciones de equilibrio.

SOLUCIÓN

Usaremos la línea de enlace hasta la temperatura solidus de equilibrio para calcular composiciones y porcentajes de las fases con la regla de la palanca. De igual manera, se usará la temperatura solidus fuera de equilibrio para calcular los porcentajes y las concentraciones de las diversas fases que se forman bajo condiciones fuera de equilibrio.

Temperatura	Equilibrio	Desequilibrio
1300 °C	L: 40% Ni 100% L	L: 40% Ni 100% L
1280 °C	L: 40% Ni 100% L α : 52% Ni ~ 0%	L: 40% Ni 100% L
1260 °C	L: 34% Ni $\frac{46 - 40}{46 - 34} = 50\%$ L α : 46% Ni $\frac{40 - 34}{46 - 34} = 50\%$ α	L: 34% Ni $\frac{51 - 40}{51 - 34} = 65\%$ L α : 51% Ni $\frac{40 - 34}{51 - 34} = 35\%$ α
1240 °C	L: 28% Ni ~ 0% L α : 40% Ni 100% α	L: 28% Ni $\frac{48 - 40}{48 - 28} = 40\%$ L α : 48% Ni $\frac{40 - 28}{48 - 28} = 60\%$ α
1200 °C	α : 40% Ni 100% α	L: 20% Ni $\frac{43 - 40}{43 - 20} = 13\%$ L α : 43% Ni $\frac{40 - 20}{43 - 20} = 87\%$ α
1150 °C	α : 40% Ni 100% α	α : 40% Ni 100% α

Microsegregación La composición no uniforme que se produce en la solidificación fuera de equilibrio se llama segregación. La **microsegregación**, llamada también **segregación interdendrítica**, se forma en distancias cortas, con frecuencia entre brazos dendríticos pequeños. Los centros de las dendritas, que representan el primer sólido en solidificar, son ricos en el elemento con mayor punto de fusión en la aleación. Las regiones entre las dendritas son ricas en el elemento con menor punto de fusión, porque esas regiones representan el último líquido en solidificar. La composición y las propiedades de la fase α (en el caso de las aleaciones Cu-Ni) son distintas de una región a la siguiente, y cabe esperar que el resultado sea que la pieza tenga propiedades más malas.

La microsegregación puede causar **fragilidad en caliente**, o fusión del material interdendrítico de menor punto de fusión a temperaturas menores que la de solidus de equilibrio. Cuando se calienta la aleación de Cu-40% Ni a 1225 °C, abajo de la de solidus de equilibrio, pero mayor que la solidus de desequilibrio, se funden las regiones de contenido bajo en níquel entre las dendritas.

Homogeneización La segregación interdendrítica y los problemas de la fragilidad en caliente pueden reducirse mediante un **tratamiento térmico de homogeneización**. Si la pieza

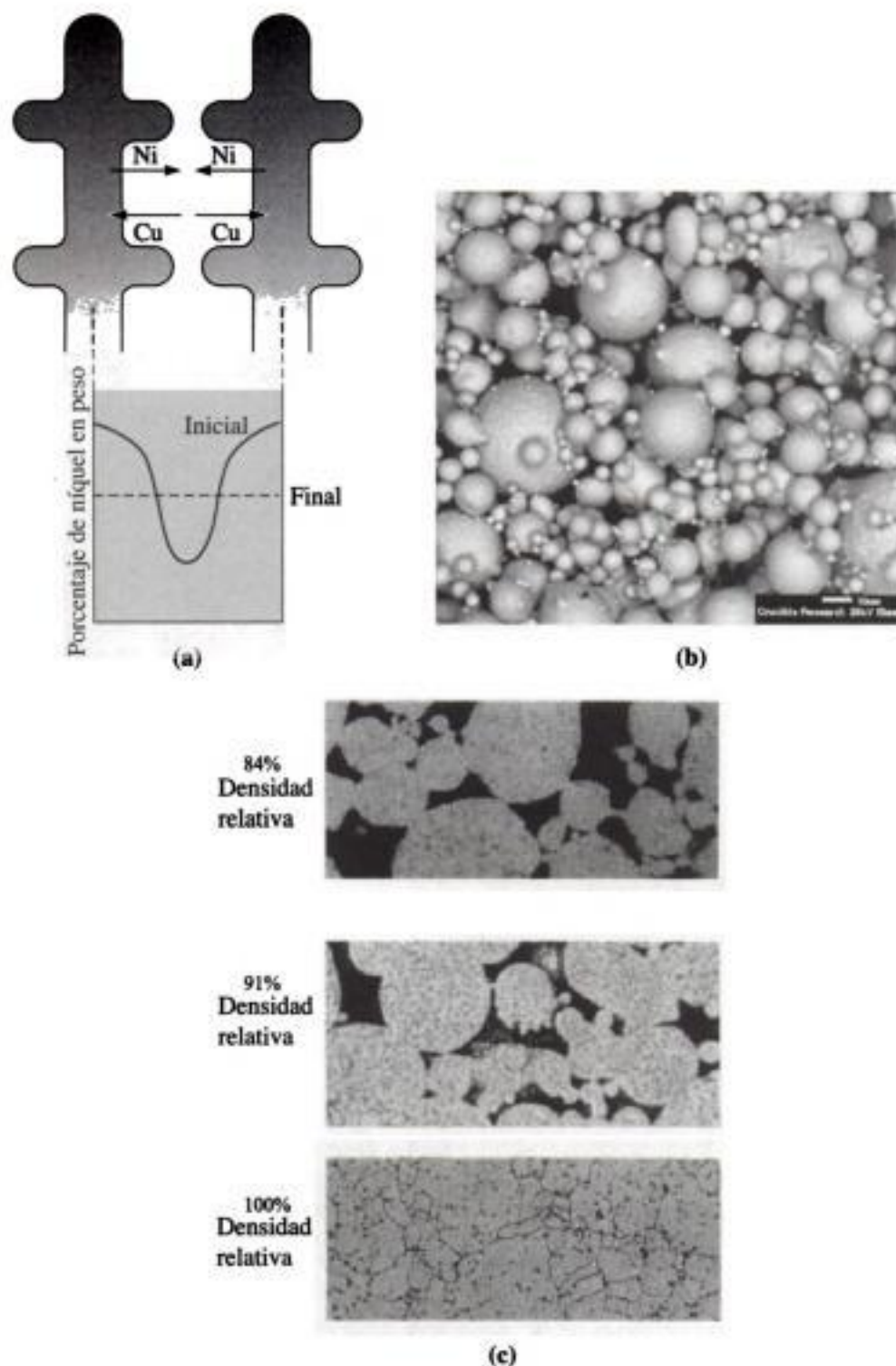


Figura 9-19 (a) La microsegregación entre dendritas puede reducirse con un tratamiento térmico de homogeneización. La difusión opuesta de los átomos de níquel y cobre puede eliminar finalmente los gradientes de composición y producir una composición homogénea. (b) Polvos de superaleaciones atomizadas. (c) Avance de la densificación en una muestra de Astroalloy de bajo carbono, procesada con prensado isostático en caliente. (Cortesía de J. Staite, Hann, B. y Rizzo, F., *Crucible Compaction Metals*.)

se calienta a una temperatura menor que la de solidus de disequilibrio, los átomos de níquel en los centros de las dendritas se difunden hacia las regiones interdendríticas; los átomos de cobre se difunden en dirección contraria [Fig. 9-19(a)]. Como las distancias de difusión son relativamente pequeñas, sólo se requieren unas cuantas horas para eliminar la mayoría de las diferencias de composición. El tiempo de homogeneización se relaciona con la distancia como sigue:

$$t = c \frac{(\text{SDAS})^2}{D_s} \quad (9-6)$$

donde SDAS es la distancia entre brazos dendríticos secundarios, D_s es la velocidad de difusión del soluto en la matriz y c es una constante. Una SDAS pequeña reduce la distancia de difusión y permite tener tiempos cortos de homogeneización.

Macrosegregación Existe otra clase de segregación, llamada **macrosegregación**, que ocurre a distancias grandes, entre la superficie y el centro de la pieza fundida, donde la superficie (que se solidifica primero) contiene algo más de concentración del metal de mayor punto de fusión que el promedio. No se puede eliminar la macrosegregación con un tratamiento de homogeneización, porque las distancias de difusión son demasiado grandes. Se puede reducir la macrosegregación por trabajo en caliente, el cual se describió en el capítulo 7. Esto se debe a que en el trabajo en caliente lo que se hace básicamente es destruir la estructura de colada.

Polvos solidificados rápidamente En aplicaciones en las que se deben eliminar la porosidad, microsegregación y macrosegregación, se preparan polvos de aleaciones complejas por atomización [Fig. 9-19(b)]. [7] En la **atomización por rociado**, se preparan fundidos homogéneos de composiciones complejas y se rocían a través de una boquilla de cerámica. La corriente del fundido se rompe en gotitas pequeñas y se templea con argón (Ar) o nitrógeno (N_2) gaseoso (atomización gaseosa), o con agua (atomización en agua). Las gotitas fundidas solidifican con rapidez, generando partículas de polvo con un rango de tamaños de ~10 a 100 μm de diámetro. Como la solidificación en las gotitas es muy rápida, hay poco tiempo para la difusión. En consecuencia, no tiene lugar la segregación química. Muchas superaleaciones a base de níquel y cobalto y polvos de aceros inoxidable son ejemplos de materiales que se preparan con esta técnica. Los polvos atomizados se mezclan y se moldean en las formas que se desea. Las técnicas que se usan para procesar esos polvos son, entre otras, sinterización (capítulo 5), **prensado en caliente** y **prensado isostático en caliente** (HIP, por sus siglas en inglés). En el prensado isostático en caliente se hace una sinterización bajo una presión isostática (igual en todas direcciones) de unas 25 000 psi usando, por ejemplo, argón gaseoso. De este modo se pueden procesar partes muy grandes (hasta de 2 pies de diámetro y varios pies de longitud) o pequeñas. Los componentes pequeños, como son los discos que sujetan los álabes de las turbinas, se pueden maquinar de las piezas obtenidas. El avance de la densificación de una muestra de Astroalloy de bajo carbono, procesada con polvos atomizados, se muestra en la figura 9-19(c). [7]

El prensado en caliente es sinterizado bajo una presión uniaxial y se utiliza en la fabricación de componentes pequeños de materiales que de otra forma sería difícil de sinterizar (capítulo 14). Las técnicas de HIP y de prensado en caliente se utilizan en materiales metálicos y en polvos cerámicos. Por ejemplo el carburo de silicio (SiC), el nitruro de silicio (Si_3N_4) y el PLZT (titanato de zirconio lantano y plomo) con frecuencia se elaboran con el prensado en caliente, ya que no es posible conseguir altas densidades con el sinterizado convencional. La presión usada proporciona una fuerza impulsora adicional para lograr la densificación. Obsérvese que no utilizamos la atomización por rociado para fabricar polvos cerámicos, pues éstos se funden a muy altas temperaturas. En la preparación de polvos cerámicos es más frecuente el uso del proceso de mezcla de óxido (capítulo 14).

RESUMEN

- Una fase es cualquier porción, que incluye la totalidad de un sistema físicamente homogéneo en su interior y limitada por una superficie, de tal modo que es mecánicamente separable de todas las demás porciones.
- Un diagrama de fases muestra las fases que se espera estén presentes en un sistema bajo condiciones de equilibrio termodinámico. A veces también puede mostrar fases metaestables.
- Las soluciones sólidas se forman en materiales metálicos o cerámicos cuando elementos o compuestos de estructura cristalina similar forman una fase que es químicamente homogénea.
- La formación de soluciones sólidas de materiales cerámicos y semiconductores es una forma adecuada para “sintonizar” las propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas.
- En los plásticos se pueden formar copolímeros haciendo reaccionar monómeros de distintas clases. La formación de copolímeros se parece a la formación de soluciones sólidas de sistemas metálicos o cerámicos.
- El endurecimiento por solución sólida se obtiene en los materiales metálicos al formar soluciones sólidas. Los defectos puntuales que se crean resisten el movimiento de las dislocaciones y causan el endurecimiento o reforzamiento.
- El grado de endurecimiento por solución sólida aumenta cuando 1) aumenta la cantidad de elemento aleante y 2) aumenta la diferencia en tamaños atómicos entre el material solvente y el soluto o elemento aleante.
- La cantidad de elemento (o compuesto) aleante que se puede agregar para obtener endurecimiento por solución sólida está limitada por la solubilidad de ese elemento en el material anfitrión. La solubilidad es limitada cuando 1) la diferencia en tamaños atómicos es más de un 15%, 2) el elemento (o compuesto) aleante tiene una estructura cristalina diferente de la del elemento (o compuesto) anfitrión o solvente y 3) la valencia y la electronegatividad del elemento aleante o los iones componentes son distintas de las del elemento (o compuesto) anfitrión o solvente.
- Además de aumentar la resistencia y la dureza, el endurecimiento por solución sólida disminuye normalmente la ductilidad y la conductividad eléctrica de los materiales metálicos. Una función importante del endurecimiento por solución sólida es proporcionar buenas propiedades a la aleación a altas temperaturas.
- La adición de elementos aleantes para proporcionar el endurecimiento por solución sólida cambia también las propiedades físicas de la aleación, entre ellas la temperatura de fusión. El diagrama de fases ayuda a explicar estos cambios.
- Un diagrama de fases cuyos componentes poseen solubilidad sólida completa se llama diagrama de fases isomorfo.
- Como resultado de la formación de soluciones sólidas, la solidificación comienza en la temperatura liquidus y termina en la de solidus. La diferencia de temperaturas en la que se efectúa la solidificación es el intervalo de solidificación.
- En regiones de dos fases del diagrama de fases, los extremos de una línea de enlace o isoterma determinan la composición de cada fase, y la regla de la palanca permite calcular la cantidad de cada fase.

- Durante la solidificación, ocurren la microsegregación y la macrosegregación. La microsegregación abarca distancias pequeñas, y con frecuencia es entre dendritas. Los centros de las dendritas son ricos en el elemento con más alto punto de fusión, mientras que las regiones interdendríticas, que son las últimas en solidificar, son ricas en el elemento con punto de fusión más bajo.
- La microsegregación se puede reducir mediante la homogeneización.
- La macrosegregación describe diferencias de composición a grandes distancias, como entre la superficie y el centro de una pieza colada. El trabajo en caliente puede reducir la macrosegregación.
- La atomización por rociado se usa para producir materiales metálicos de varios componentes que deban obtenerse sin segregación química y en forma de polvos.
- La sinterización, el prensado en caliente y el prensado isostático en caliente son técnicas que también se aplican en el procesamiento de los polvos metálicos y cerámicos. Se pueden obtener densidades muy altas mediante el prensado en caliente y el prensado isostático en caliente.

GLOSARIO

Aceros inoxidables Aleaciones resistentes a la corrosión que suelen contener hierro (Fe), carbono (C), cromo (Cr), níquel (Ni) y algunos otros elementos.

Aleación Material que tiene propiedades de material metálico, obtenido a partir de varios elementos.

Aleación monofásica Aleación formada por una fase.

Aleación polifásica Aleación formada por dos o más fases.

Atomización por rociado Proceso en el cual las aleaciones o los metales fundidos se rocían con una boquilla cerámica. El material fundido se rompe con un gas (por ejemplo Ar, N₂) o con agua. Esto produce gotitas más finas que se solidifican con rapidez formando polvos metálicos o de aleaciones con diámetros de partícula en el intervalo de ~10 a 100 μm .

Copolímero Polímero que se forma combinando dos o más monómeros distintos, en general con la idea de mezclar las propiedades de los polímeros individuales; un ejemplo es el Dylark™, copolímero de anhídrido maleico y estireno.

Diagrama de fase unario Diagrama de fases en el que sólo hay un componente.

Diagrama de fases Diagrama que muestra las fases presentes bajo condiciones de equilibrio, así como la composición de la fase en cada combinación de temperatura y composición general. En ocasiones este tipo de diagramas también señalan fases metaestables.

Diagrama de fases binario Diagrama de fases para un sistema con dos componentes.

Diagrama de fases isomorfo Diagrama de fases cuyos componentes presentan solubilidad sólida ilimitada.

Diagrama P-T Diagrama que describe la estabilidad termodinámica de las fases bajo distintas condiciones de temperatura y presión; es lo mismo que un diagrama de fase unario.

Endurecimiento por dispersión de segundas fases Endurecimiento que normalmente se hace en materiales metálicos por la formación de dispersiones ultrafinas de una segunda fase. La interfaz entre la fase recién formada y la matriz proporciona una resistencia adicional al movimiento de las dislocaciones, causando así el reforzamiento de los materiales metálicos (capítulo 10).

Endurecimiento por solución sólida Aumento de la resistencia de un material metálico por la formación de una solución sólida.

Fase Toda porción, incluyendo la totalidad del sistema, que es físicamente homogénea, y está limitada por una superficie, de modo que sea mecánicamente separable de las demás porciones.

Fase metaestable Material, como líquido subenfriado, que existe bajo condiciones fuera de equilibrio. Una fase metaestable suele formarse sólo en una dirección, por ejemplo, el agua subenfriada se puede formar enfriando agua abajo de la temperatura de congelación, pero no calentando hielo.

Fragilidad en caliente Fusión del material de menor punto de fusión fuera de equilibrio, que se forma por segregación, aunque la temperatura sea menor que la temperatura solidus en equilibrio.

Intervalo de solidificación Diferencia de temperaturas de liquidus y de solidus.

Línea de enlace o isoterma Línea horizontal o a temperatura constante trazada en una región de dos fases, en un diagrama de fases, para ayudar a determinar las composiciones de ambas.

Liquidus Curvas o líneas, en el diagrama de fases, que describen las temperaturas de líquido de todas las aleaciones posibles.

Macrosegregación Presencia de diferencias de composición en un material, a grandes distancias, causada por solidificación en desequilibrio. La única forma de eliminar esta clase de segregación es destruir la estructura del colado mediante trabajo en caliente.

Microsegregación Segregación química en los productos colados, que también se llama segregación interdendrítica. Los centros de las dendritas son ricos en el elemento con mayor punto de fusión, mientras que las regiones interdendríticas, que se solidifican al final, son ricas en el elemento de menor punto de fusión.

Prensado en caliente (HP, por sus siglas en inglés) Sinterización de polvos metálicos o cerámicos bajo una presión uniaxial. Se usa para producir componentes pequeños con materiales que de otra manera son difíciles de sinterizar.

Prensado isostático en caliente (HIP, por sus siglas en inglés) Sinterización de polvos metálicos o cerámicos efectuada bajo una presión isostática.

Punto triple Presión y temperatura a las que están en equilibrio las tres fases de un solo material.

Regla de la palanca Técnica para determinar la cantidad de cada fase en un sistema de dos fases.

Regla de las fases Véase regla de las fases de Gibbs.

Regla de las fases de Gibbs Describe la cantidad de grados de libertad, es decir, la cantidad de variables que deben fijarse para especificar la temperatura y la composición de una fase. Es $2 + C = F + P$, cuando la presión y la temperatura pueden cambiar, y es $1 + C = F + P$, cuando la presión o la temperatura es constante.

Reglas de Hume-Rothery Condiciones que debe cumplir una aleación o un sistema cerámico para que tenga solubilidad sólida ilimitada. Las reglas de Hume-Rothery son necesarias pero no suficientes para determinar la solubilidad sólida ilimitada.

Secado por congelación (o liofilizado) Proceso para materiales y productos alimenticios en el que se enfría una solución hasta que se convierte en sólido. A continuación se subliman el agua y otras sustancias, dejando atrás al sólido.

Segregación Presencia de diferencias de composición en un material, causadas con frecuencia por tiempo insuficiente para la difusión durante la solidificación.

Segregación interdendrítica Véase "Microsegregación".

Solidus Curvas o líneas en los diagramas de fases que indican las temperaturas de sólido para todas las aleaciones posibles.

Solubilidad Cantidad de un material que se disuelve por completo en un segundo material sin crear una segunda fase.

Solubilidad ilimitada Cuando es ilimitada la cantidad de un material que se disuelve en un segundo material sin crear una segunda fase.

Solubilidad limitada Cuando sólo se puede disolver una cantidad máxima de un soluto en un solvente.

Solución sólida Fase sólida formada combinando varios elementos o compuestos en tal forma que en general la fase tiene composición y propiedades uniformes, que son distintas de las de los elementos o compuestos que la forman.

Temperatura de líquido Temperatura a la que comienza a formarse el primer sólido durante la solidificación.

Temperatura de sólido Temperatura abajo de la cual todo el líquido se ha solidificado por completo.

Tratamiento térmico de homogeneización Tratamiento térmico que se usa para reducir la microsegregación originada durante la solidificación fuera de equilibrio. El tratamiento térmico no puede eliminar la macrosegregación.

ADICIONAL

1. BERGERON, C.G. y RISBUD, S.H. *Introduction to Phase Equilibria*, American Ceramic Society, 1984.
2. GIBBS, W.J. *The Scientific Papers of J. Willard Gibbs: Thermodynamics* (reimpresiones de los trabajos), Ox Bow Press, 1993.
3. ASCHKENASY, H. "Freeze Drying", *Scientific American* (9), 1996.
4. STRONG, B.A. *Plastics-Materials and Processing*, 2a. ed., Prentice Hall, 2000.
5. ARCH, P. *Nova Chemicals, se agradecen las explicaciones y la asistencia técnica*, 2002.
6. HOSFORD, W.F. y J.L. DUNCAN. "The Aluminum Beverage Can", *Scientific American*, septiembre, 1994, pp. 48-53.
7. STAITE, J., HANN, B. y RIZZO, F. *Se agradecen las explicaciones y la asistencia técnica*, 2002.



PROBLEMAS

- 9-1 Explique el principio de endurecimiento por refinamiento del tamaño de grano. Este mecanismo ¿funciona a altas temperaturas? Explique por qué.
- 9-2 Explique el principio del endurecimiento por deformación. Este mecanismo ¿funciona a altas temperaturas? Explique por qué.
- 9-3 ¿Cuál es el principio de endurecimiento por solución sólida? ¿Funciona este mecanismo a altas temperaturas? Explique por qué.
- 9-4 ¿Cuál es el principio de endurecimiento por dispersión de fases?

Sección 9-1 Fases y diagramas de fases

- 9-5 ¿Qué significa el término "fase"?
- 9-6 ¿Cuáles son las distintas fases del agua?
- 9-7 Se sabe que el hielo existe como diversos polimorfos. ¿Son ellos distintas fases del agua?
- 9-8 Escriba la regla de las fases de Gibbs, suponiendo que se permite variar la presión y la temperatura. Explique con claridad el significado de cada término.
- 9-9 ¿Qué es un diagrama de fases?

- 9-10 Explique por qué el diagrama P-T del H_2O se considera diagrama de fases unario.
- 9-11 El superconductor óxido de cobre, bario e itrio (YBCO) que se describió en el ejemplo 9-2 se prepara con óxidos de itrio, bario y cobre. Para este sistema, el diagrama de fases será ¿unario, binario o ternario? Explique por qué.
- 9-12 ¿Qué es un punto triple?
- 9-13 ¿Cuáles son las presiones y temperaturas de los puntos triples del agua y del CO_2 ?
- 9-14 Explique cómo se puede preparar un polvo fino de itria estabilizada con zirconia (YSZ) con el proceso de secado por congelación (o liofilización).
- 9-15 En la figura 9-3(c) se muestra el diagrama de fase unario para el SiO_2 . Ubique el punto triple donde coexisten sólido, líquido y vapor, y cite la temperatura y la clase de sólido presente. ¿Qué indican los demás puntos "triples"?

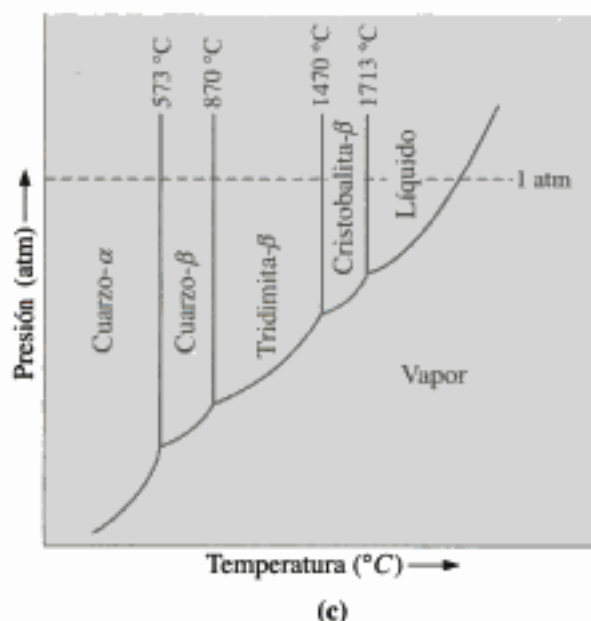


Figura 9-3 (Repetida para el problema 9-15). (c) Diagrama presión-temperatura para SiO_2 . La línea punteada indica una atmósfera de presión.

- 9-16 ¿Qué es una fase metaestable?
- 9-17 La figura 9-20 muestra el diagrama de fase unario para el carbono. De acuerdo con este diagrama ¿bajo qué condiciones puede convertirse en diamante el carbono que está en forma de grafito?
- 9-18 ¿Por qué tiene importancia el CO_2 supercrítico en aplicaciones de procesamiento de materiales y medicinas?

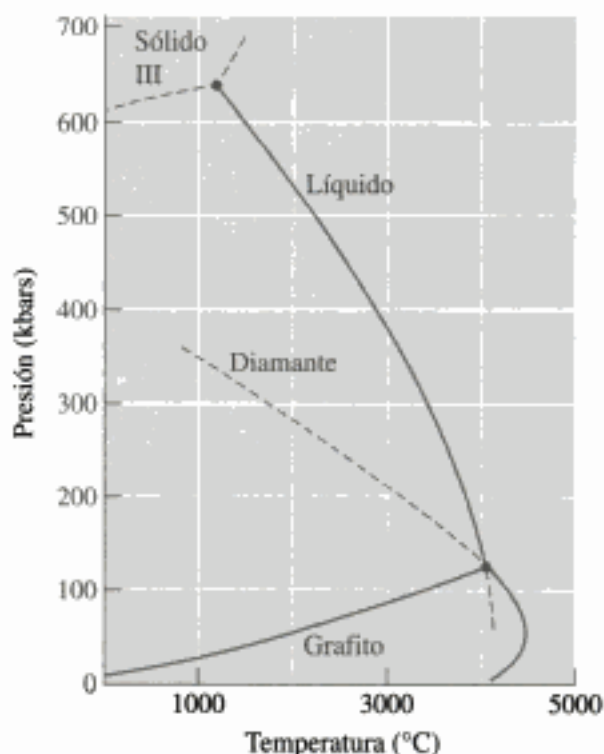


Figura 9-20 Diagrama de fase unario para el carbono. Se indica la región de formación de diamante con una línea interrumpida (para el problema 9-17). (Fuente: adaptado de *Introduction to Phase Equilibria*, por C.G. Bergeron, S.H. Risbud, fig. 2-11. Copyright © 1984, American Ceramic Society. Reproducido con autorización.)

Sección 9-2 Solubilidad y soluciones sólidas

- 9-19 ¿Qué es una solución sólida?
- 9-20 ¿Cómo pueden los sistemas cerámicos formar soluciones sólidas?
- 9-21 Se calientan polvos finos de ferrita de níquel ($NiFe_2O_4$) y ferrita de zinc ($ZnFe_2O_4$) a alta temperatura ($\sim 1000^\circ C$) durante 24 horas. Explique qué puede suceder al final de este proceso.
- 9-22 Explique cómo se pueden controlar las propiedades dieléctricas y magnéticas de materiales como $BaTiO_3$ y las ferritas, mediante la formación de soluciones sólidas.
- 9-23 ¿Por qué la formación de soluciones sólidas de distintas composiciones de GaAs-AlAs produce LED de diversos colores?
- 9-24 ¿Se necesita tener 100% de solubilidad sólida para formar una solución sólida de un material en otro?
- 9-25 Se agregan pequeñas concentraciones de zirconato de plomo ($PbZrO_3$) a titanato de plomo ($PbTiO_3$). Trace un esquema de la estructura cristalina de la solución

sólida resultante. Este material, llamado titanato de plomo y zirconio (o *PZT*), tiene muchas aplicaciones, desde los encendedores de chispa hasta las imágenes ultrasónicas. Véase en el capítulo 3 la información sobre la estructura cristalina de la perovskita.

- 9-26 ¿Las soluciones sólidas se pueden formar con tres elementos o con tres compuestos?
- 9-27 ¿Qué es un copolímero? ¿Qué ventaja tiene preparar copolímeros?
- 9-28 La formación de copolímeros ¿tiene semejanza con la formación de soluciones sólidas?
- 9-29 ¿Qué es el polímero ABS? Describa algunas de las aplicaciones de este material.
- 9-30 ¿Qué es el Dylark™? ¿Cuáles son algunas de sus aplicaciones?
- 9-31 ¿Qué otras sustancias se agregan al Dylark™? ¿Por qué? Esos compuestos ¿forman una solución sólida o una mezcla?

Sección 9-3 Condiciones para la solubilidad ilimitada

- 9-32 Enuncie las reglas de Hume-Rothery y explique su significado.
- 9-33 Las reglas de Hume-Rothery, ¿se pueden aplicar a sistemas cerámicos? Explique por qué.
- 9-34 Con base en las reglas de Hume-Rothery ¿cuáles de los siguientes sistemas son de esperar que tengan solubilidad sólida ilimitada? Explique por qué. a) Au-Ag, b) Al-Cu, c) Al-Au, d) U-W, e) Mo-Ta, f) Nb-W, g) Mg-Zn y h) Mg-Cd.

Sección 9-4 Endurecimiento por solución sólida

- 9-35 Suponga que se agrega 1% atómico de los siguientes elementos al cobre (formando una aleación con cada elemento) sin llegar al límite de solubilidad. ¿Cuál de ellos se espera que forme la aleación con mayor resistencia? ¿Es de esperarse que alguno(s) del o los elemento(s) aleante(s) tenga(n) solubilidad sólida ilimitada en el cobre? a) Au, b) Mn, c) Sr, d) Si y e) Co.
- 9-36 Suponga que se agrega 1% atómico de los elementos siguientes al aluminio (formando una aleación con cada elemento) sin llegar al límite de la solubilidad. ¿Cuál de ellos se espera que proporcione la menor reducción en la conductividad eléctrica? ¿Se espera que alguno(s) del o los elemento(s) tenga(n) solubilidad sólida ilimitada en el aluminio? a) Li, b) Ba, c) Be, d) Cd y e) Ga.
- 9-37 ¿Cuál de los siguientes óxidos se espera que tenga la mayor solubilidad en Al_2O_3 ? a) Y_2O_3 , b) Cr_2O_3 y c) Fe_2O_3 .

- 9-38 ¿Cuál es la función de pequeñas concentraciones de Mg en las aleaciones de aluminio con que se fabrican las latas para bebidas?
- 9-39 ¿Por qué los joyeros agregan pequeñas cantidades de cobre al oro y a la plata?
- 9-40 ¿Por qué no se aconseja usar el endurecimiento por solución sólida como mecanismo para aumentar la resistencia del cobre que se usa en aplicaciones eléctricas?

Sección 9-5 Diagramas de fases isomorfo

- 9-41 Determine la temperatura liquidus, solidus y el intervalo de solidificación para las siguientes composiciones cerámicas de NiO-MgO. [Véase la Fig. 9-10(b).] a) NiO-30% mol MgO, b) NiO-45% mol MgO, c) NiO-60% mol MgO y d) NiO-85% mol MgO.

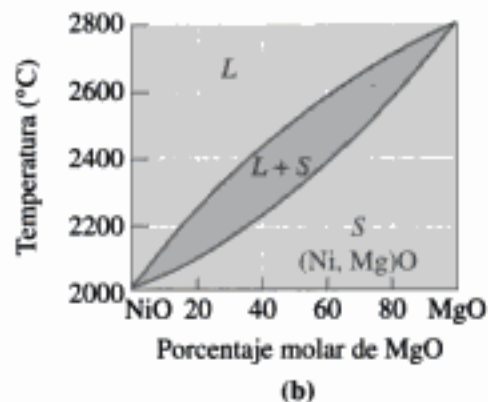


Figura 9-10 (Repetida para los problemas 9-41, 9-43 y 9-46). (b) Se indican las temperaturas liquidus y solidus para una aleación de Cu-40% Ni.

- 9-42 Determine la temperatura liquidus, solidus y el intervalo de solidificación para las siguientes composiciones cerámicas de MgO-FeO. (Véase la Fig. 9-21.)
- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| a) MgO-25% en peso FeO, | b) MgO-45% en peso FeO, |
| c) MgO-65% en peso FeO, | d) MgO-80% en peso FeO. |
- 9-43 Determine las fases presentes, la composición de cada fase y la cantidad de cada fase, en % mol, de las siguientes cerámicas de NiO-MgO, a 2400 °C. [Véase la Fig. 9-10(b).] a) NiO-30% mol MgO, b) NiO-45% mol MgO, c) NiO-60% mol MgO y d) NiO-85% mol MgO.
- 9-44 a) Determine las fases presentes, la composición de cada fase y la cantidad de cada fase, en % en peso, de las siguientes cerámicas de MgO-FeO, a 2000 °C. (Véase la Fig. 9-21.) i) MgO-25% en peso FeO, ii) MgO-45% en peso FeO, iii) MgO-60% en peso FeO y iv) MgO-80%

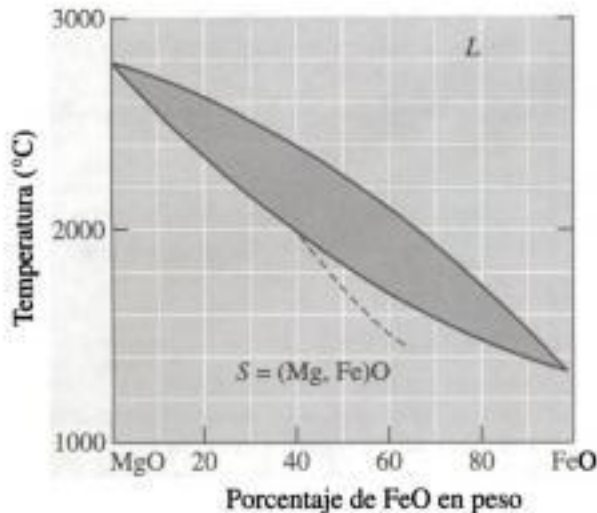


Figura 9-21 Diagrama de fases en equilibrio para el sistema MgO-FeO.

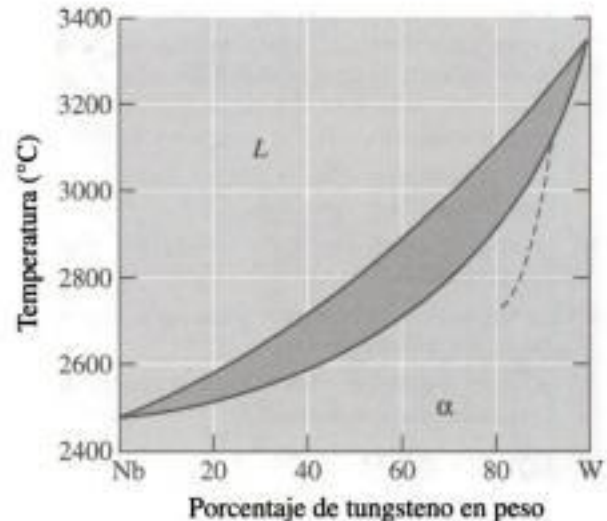


Figura 9-22 Diagrama de fases en equilibrio para el sistema Nb-W.

- en peso FeO. b) Para una aleación de 65% en peso de Cu y 35% en peso de Al, calcule su composición en % átomos.
- 9-45 Un material cerámico está compuesto por 30% mol de MgO y 70% mol de FeO. Calcule la composición del material en % en peso.
- 9-46 Una cerámica de NiO-20% mol MgO se calienta a 2200 °C. Determine a) la composición de las fases sólida y líquida, en % mol y en % en peso; b) la cantidad de cada fase, en % mol y en % en peso, y c) suponga que la densidad del sólido es 6.32 g/cm³, y que la del líquido es 7.14 g/cm³, calcule la cantidad de cada fase en % en volumen. [Véase la Fig. 9-10(b).]
- 9-47 Se calienta una aleación de Nb-60% en peso de W a 2800 °C. Determine a) la composición de las fases sólida y líquida, en % en peso y en % atómico; b) la cantidad de cada fase, en % en peso y en % atómico y c) suponiendo que la densidad del sólido es 16.05 g/cm³ y que la del líquido es 13.91 g/cm³, determine la cantidad de cada fase en % en volumen. (Véase la Fig. 9-22.)
- 9-48 ¿Cuántos gramos de níquel es necesario agregar a 500 gramos de cobre para producir una aleación que tenga 1350 °C de temperatura de liquidus? ¿Cuál es la relación de la cantidad de átomos de níquel a átomos de cobre en esta aleación?
- 9-49 ¿Cuántos gramos de níquel es necesario agregar a 500 gramos de cobre para obtener una aleación que contenga 50% en peso de fase α a 1300 °C?
- 9-50 ¿Cuántos gramos de MgO se deben agregar a 1 kg de NiO para obtener una cerámica que tenga una temperatura solidus de 2200 °C?
- 9-51 ¿Cuántos gramos de MgO se deben agregar a 1 kg de NiO para obtener un cerámico que contenga 25% mol de sólido a 2400 °C?
- 9-52 Desearíamos producir un cerámico sólido de MgO-FeO que contenga iguales porcentajes molares de MgO y FeO a 1200 °C. Determine el % en peso de FeO en el cerámico. (Véase la Fig. 9-21.)
- 9-53 Desearíamos producir un cerámico de MgO-FeO que tenga 30% en peso de sólido a 2000 °C. Determine la composición original de la cerámica en % en peso. (Véase la Fig. 9-21.)
- 9-54 Una aleación Nb-W se mantiene a 2800 °C es en parte líquida y en parte sólida. a) Si es posible, determine la composición de cada fase en la aleación, y b) si es posible, determine la cantidad de cada fase en la aleación. (Véase la Fig. 9-22.)
- 9-55 Una aleación de Nb-W contiene 55% de fase α a 2600 °C. Determine a) la composición de cada fase y b) la composición de la aleación original. (Véase la Fig. 9-22.)
- 9-56 Suponga que un baño con 1200 lb de una aleación de Nb-40% en peso de W se mantiene a 2800 °C. ¿Cuántas libras de tungsteno pueden agregarse al baño sin que se forme un sólido? ¿Cuántas libras de tungsteno se deben agregar para hacer que todo el baño sea sólido? (Véase la Fig. 9-22.)
- 9-57 Se produce un material compuesto: matriz de Nb con fibras de tungsteno embebidas. Este material contiene 70% en volumen de tungsteno. a) Calcule el % en peso de las fibras de tungsteno en el material, y b) suponga que se calienta el material a 2600 °C, durante varios años. ¿Qué pasa con las fibras? Explique por qué. (Véase la Fig. 9-22.)

- 9-58 Suponga que se usa un crisol de níquel puro para contener 500 g de cobre líquido a 1150 °C. Describa lo que sucede con el sistema al mantenerlo a esta temperatura durante varias horas. Explique por qué.

Sección 9-6 Relación entre las propiedades y el diagrama de fases

- 9-59 ¿Qué es el latón? Explique cuál elemento endurece la matriz en esta aleación.
- 9-60 ¿Cuál es la composición de la aleación llamada Monel?

Sección 9-7 Solidificación de aleaciones de solución sólida

- 9-61 Se mezclan y se funden cantidades molares iguales de MgO y FeO. Determine a) la temperatura liquidus, la temperatura solidus y el intervalo de solidificación del cerámico; y b) determine la o las fases presentes, su o sus composiciones y su o sus cantidades, a 1800 °C. (Véase la Fig. 9-21.)
- 9-62 Suponga que se mezclan y se funden 75 cm³ de Nb y 45 cm³ de W. Determine a) la temperatura liquidus, la temperatura solidus y el intervalo de solidificación de la aleación; y b) determine la o las fase(s) presente(s), su o sus composición(nes) y su o sus cantidad(des), a 2800 °C. (Véase la Fig. 9-22.)
- 9-63 Se deja solidificar una cerámica de NiO-60% mol MgO. Determine a) la composición del primer sólido en formarse y b) la composición del último líquido en solidificarse, ambas bajo condiciones de equilibrio.
- 9-64 Se deja solidificar una aleación de Nb-35% W. Determine a) la composición del primer sólido en formarse y b) la composición del último líquido en solidificar, ambas bajo condiciones de equilibrio. (Véase la Fig. 9-22.)
- 9-65 En condiciones de equilibrio y con una cerámica de MgO-65% en peso FeO, determine a) la temperatura liquidus, b) la temperatura solidus, c) el intervalo de solidificación, d) la composición del primer sólido en formarse, e) la composición del último líquido en solidificar, f) la o las fase(s) presente(s), su composición y su cantidad a 1800 °C y g) la o las fase(s) presente(s), su composición y su cantidad a 1600 °C. (Véase la Fig. 9-21.)
- 9-66 La figura 9-23 muestra la curva de enfriamiento de un cerámico de NiO-MgO. Determine a) la temperatura liquidus, b) la temperatura solidus, c) el intervalo de solidificación, d) la temperatura de vaciado, e) el sobrecalentamiento, f) el tiempo de solidificación local, g) el tiempo de solidificación total y h) la composición del cerámico.

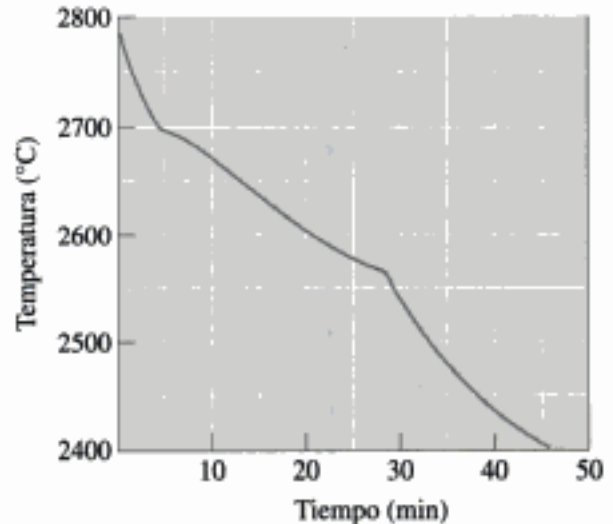


Figura 9-23 Curva de enfriamiento de un cerámico de NiO-MgO (para el problema 9-66).

- 9-67 Para una aleación de Nb-80% en peso W en condiciones de equilibrio, determine a) la temperatura liquidus, b) la temperatura solidus, c) el intervalo de solidificación, d) la composición del primer sólido en formarse durante la solidificación, e) la composición del último líquido en solidificar, f) la o las fases presentes, su composición y su cantidad a 3000 °C; y g) la o las fases presentes, su composición y su cantidad a 2800 °C. (Véase la Fig. 9-22.)
- 9-68 La figura 9-24 muestra la curva de enfriamiento de una aleación Nb-W. Determine a) la temperatura liquidus, b) la temperatura solidus, c) el intervalo de

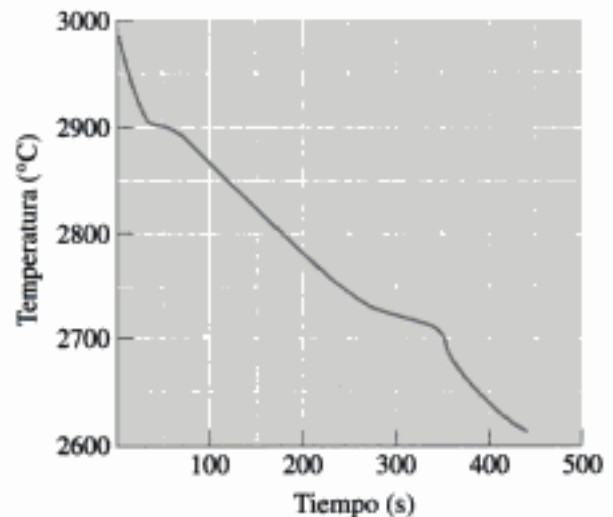


Figura 9-24 Curva de enfriamiento de una aleación de Nb-W (para el problema 9-68).

enfriamiento, d) la temperatura de vaciado, e) el sobrecalentamiento, f) el tiempo de solidificación local, g) el tiempo total de solidificación y h) la composición de la aleación.

- 9-69 En la figura 9-25 se muestran curvas de enfriamiento para varias aleaciones de Mo-V. De acuerdo con esas curvas, trace el diagrama de fases Mo-V.

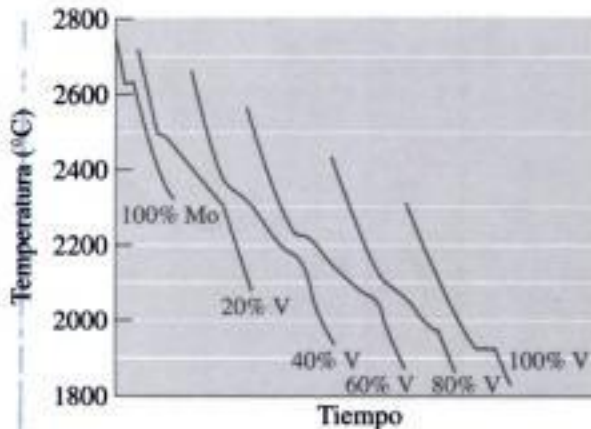


Figura 9-25 Curvas de enfriamiento para una serie de aleaciones de Mo-V (para el problema 9-69).

Sección 9-8 Solidificación fuera de equilibrio y segregación

- 9-70 ¿Cuáles son las causas de la segregación química en los productos fundidos?
- 9-71 Para las condiciones fuera de equilibrio indicadas para el cerámico MgO -65% en peso FeO , determine a) la temperatura líquida, b) la temperatura sólida fuera de equilibrio, c) el intervalo de solidificación, d) la composición del primer sólido en formarse durante la solidificación, e) la composición del último líquido en solidificar, f) la o las fase(s) presente(s), su composición y su cantidad a 1800°C y g) la o las fase(s) presente(s), su composición y su cantidad a 1600°C . (Véase la Fig. 9-21.)
- 9-72 Para las condiciones fuera de equilibrio indicadas para la aleación Nb -80% en peso W , determine a) la temperatura líquida, b) la temperatura sólida fuera de equilibrio, c) el intervalo de solidificación, d) la composición del primer sólido en formarse durante la solidificación, e) la composición del último líquido en solidificar, f) la o las fase(s) presente(s), su composición y su cantidad a 3000°C y g) la o las fase(s) presente(s), su composición y su cantidad a 2800°C . (Véase la Fig. 9-22.)
- 9-73 ¿Cómo se puede eliminar la microsegregación?

- 9-74 ¿Qué es la macrosegregación? ¿Hay forma de eliminarla sin destruir la estructura de colada?
- 9-75 ¿Qué es el recocido de homogeneización? ¿Qué clase de segregación puede eliminar?
- 9-76 ¿Qué es la atomización por rociado? Se puede usar para preparar polvos de cerámica?
- 9-77 Suponga que se le pide fabricar un componente crítico a base de una superaleación de níquel. El componente no debe contener porosidad alguna y debe ser homogéneo químicamente. ¿Qué proceso de manufactura usaría para esta aplicación? ¿Por qué?
- 9-78 ¿Qué es prensado en caliente? ¿En qué difiere del prensado isostático en caliente?



Problemas de diseño

- 9-79 La homogeneización de una aleación de Cu-Ni enfriada lentamente, que tiene 0.025 cm de distancia entre brazos dendríticos secundarios, SDAS, requiere 8 horas a 1000°C . Diseñe un proceso para obtener una estructura homogénea en una aleación de Cu-Ni que se enfrió con más rapidez y que tiene $\text{SDAS} = 0.005\text{ cm}$.
- 9-80 Diseñe un proceso para producir un refractario de NiO -60% MgO cuya estructura es de 40% de fase vítrea a temperatura ambiente. Incluya todas las temperaturas relevantes.
- 9-81 Diseñe un método con el que se puedan mezclar y distribuir uniformemente perlas de vidrio (con densidad 2.3 g/cm^3) en una aleación de Cu -20% Ni (con densidad de 8.91 g/cm^3).
- 9-82 Suponga que MgO contiene 5% mol de NiO . Diseñe un método de purificación por solidificación que reduzca el NiO a menos de 1% mol en el MgO .



Problemas en computadora

- 9-83 *Regla de las fases de Gibbs*. Escriba un programa que automatice el cálculo de la regla de las fases de Gibbs. Debe pedir información al usuario respecto a si se mantendrán constantes la presión y la temperatura, o sólo la presión. El programa debe usar entonces la ecuación adecuada para calcular la variable que el usuario desea conocer. El usuario proporciona datos de cantidad de componentes. A continuación, si el usuario desea ingresar la cantidad de fases presentes, el programa debe calcular los grados de libertad y viceversa.

- 9-84 *Conversión de % en peso en % atómico para un sistema binario.* Escriba un programa que permita la conversión entre % en peso y % atómico. El programa debe pedir al usuario los pesos fórmula (o pesos moleculares) de los elementos o compuestos. (Véanse las ecuaciones 9-4 y 9-5.)
- 9-86 *Reglas de Hume-Rothery.* Escriba un programa que pronostique si habrá o no 100% de solubilidad sólida entre dos elementos. El programa debe pedir al usuario

información sobre estructuras cristalinas de los elementos o compuestos, los radios de los diversos átomos o iones que intervienen y los valores de valencias y electronegatividades. Deberá suponer qué diferencia de valores de electronegatividad sería aceptable. A continuación, el programa debe usar las reglas de Hume-Rothery y guiar al usuario acerca de la posibilidad de formar un sistema que tenga 100% de solubilidad sólida.

By Arkanosant...

Capítulo



El proceso de soldadura con estaño desempeña un papel clave en el procesamiento de tarjetas de circuitos impresos y otros dispositivos de la microelectrónica. En este proceso, frecuentemente se usan aleaciones a base de plomo y estaño. Las composiciones específicas de esas aleaciones se llaman composiciones eutécticas y se funden a temperatura constante (como los elementos puros). Esas composiciones también son mecánicamente fuertes, porque su microestructura consiste de una mezcla íntima de dos fases distintas. La mejora de las propiedades mecánicas de la dispersión de una fase en otra por formación de eutécticos es el tema central de este capítulo. (Cortesía de PhotoDisc/Getty Images.)

Endurecimiento por dispersión y diagramas de fases eutécticas

¿Alguna vez se preguntó...

- ...por qué algunos de los primeros vidrieros usaron cenizas vegetales para fabricar vidrio?
- ...qué aleaciones son las que más se usan para el estañado?
- ...qué es un plástico reforzado con fibra de vidrio?
- ...qué es el vidrio Pyrex®?

Cuando se excede la solubilidad de un material por agregar demasiado elemento o compuesto aleante, se forma una segunda fase y se produce un material de dos fases. La frontera entre las dos fases se llama interfaz entre fases, y es una superficie en la que el arreglo atómico no es perfecto. En los materiales metálicos, esta frontera interfiere con el deslizamiento, o movimiento de

dislocaciones, y causa el endurecimiento de esos materiales. El término general para indicar ese endurecimiento por la introducción de una segunda fase se llama endurecimiento por dispersión. En este capítulo, describiremos los fundamentos del endurecimiento por dispersión para determinar la microestructura que debemos tratar de producir. A continuación, examinare-

mos las clases de reacciones que producen aleaciones de fases múltiples. Por último, examinaremos con cierto detalle los métodos para lograr el endurecimiento por dispersión mediante el control del proceso de solidificación. En este contexto, examinaremos diagramas de fases que implican la formación de fases múltiples. Nos concentraremos en los diagramas de fases eutécticas. En

el capítulo 11, aprenderemos una forma especial de producir una dispersión de una segunda fase, por una secuencia de transformaciones en estado sólido, llamada endurecimiento por precipitación o por envejecimiento. El endurecimiento por precipitación es un subconjunto de la clase general de los materiales endurecidos por dispersión.

10-1

Principios y ejemplos del endurecimiento por dispersión

La mayoría de los materiales diseñados están formados por más de una fase, y muchos de ellos están diseñados para tener mejor resistencia. En las **aleaciones endurecidas por dispersión** simples, se introducen partículas diminutas de una fase, en general muy fuerte y dura, en una segunda fase, que es más débil pero más dúctil.[1] La fase suave por lo general es continua y está presente en mayores cantidades; se llama **matriz**. La fase endurecedora puede llamarse **fase dispersa** o **precipitado**, dependiendo de la forma en que se obtiene la aleación. En algunos casos, esta fase, o mezcla de fases, puede tener una apariencia muy característica; en esos casos, a esta fase o mezcla de fases se le puede llamar **microconstituyente**. Para que haya endurecimiento por dispersión, la fase dispersa o precipitado debe ser lo suficientemente pequeña para proporcionar obstáculos eficaces al movimiento de las dislocaciones y favorecer el mecanismo de endurecimiento.

En la mayoría de las aleaciones metálicas, el endurecimiento por dispersión se produce mediante transformaciones de fase. En este capítulo, nos concentraremos en una transformación de solidificación, en la que un líquido se enfría para formar dos fases sólidas en forma simultánea. A esto se le llamará **reacción eutéctica** y tiene especial importancia en los hierros colados y en muchas aleaciones de aluminio. En el siguiente capítulo, describiremos la reacción eutectoide, en la que una fase sólida reacciona para formar al mismo tiempo dos fases sólidas. Esta reacción es clave para controlar las propiedades de los aceros. En el capítulo 11, también describiremos el **endurecimiento por precipitación** o **por envejecimiento**, que da como resultado precipitados mediante un tratamiento térmico complicado.

Hay ciertas consideraciones generales para determinar cómo las características de la matriz y la fase dispersa afectan a las propiedades de una aleación (Fig. 10-1).

1. La matriz debe ser suave y dúctil, aunque la fase dispersa debe ser dura y fuerte. Las partículas de la fase dispersa interfieren con el deslizamiento, mientras que la matriz proporciona al menos cierta ductilidad a la aleación.
2. La fase dispersa dura debe ser discontinua, mientras que la matriz suave y dúctil debe ser continua. Si la fase dura y frágil fuera continua, las grietas podrían propagarse por toda la estructura.
3. Las partículas de la fase dispersa deben ser pequeñas y numerosas para aumentar la probabilidad de interferir con el proceso de deslizamiento, ya que el área de la interfaz entre fases aumenta en forma importante.
4. Las partículas de la fase dispersa deben ser redondas, y no aciculares o con aristas agudas, porque es menos probable que la forma redondeada inicie una grieta o que actúe como una muesca.
5. Mayores concentraciones de la fase dispersa aumentan la resistencia de una aleación.

CADA UNO DE ESTOS ENSAYOS FOTOGRÁFICOS ILUSTR

la relación entre la estructura de un material, su proceso y cómo pueden utilizarse sus propiedades en un producto final. La relación íntima estructura-propiedades-proceso que se subraya en el texto, se demuestra en diversos materiales, incluyendo aleaciones metálicas, materiales cerámicos, polímeros y materiales compuestos.

HIERRO FUNDIDO DÚCTIL

Se puede obtener una alta resistencia mecánica en el hierro fundido mediante tratamiento térmico que, en la microestructura que aquí se ve, produce precipitados diminutos de Fe_3C en una matriz ferrítica (a).



Cortesía de American Foundryman's Society



El hierro fundido desarrolla buena ductilidad durante su tratamiento con magnesio antes de vaciar el hierro líquido en moldes (b).

Cortesía de American Foundryman's Society

Cortesía de John Deere Company

A partir de metales como el hierro fundido dúctil, se pueden producir componentes confiables, y a la vez económicos, para su uso en productos que enfrentan un servicio severo como este tractor agrícola (c). Todo esto se analiza en el capítulo 12.



ENROLLADO DE FILAMENTOS DE MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos reforzados con fibras a menudo empiezan con una tela tejida, como estas fibras de vidrio **(a)**, que después se impregnan con una resina de polímero (véase el capítulo 16). Las fibras individuales o las telas tejidas pueden entonces conformarse en formas grandes y complejas, como la carcasa del motor de un cohete **(b)**.

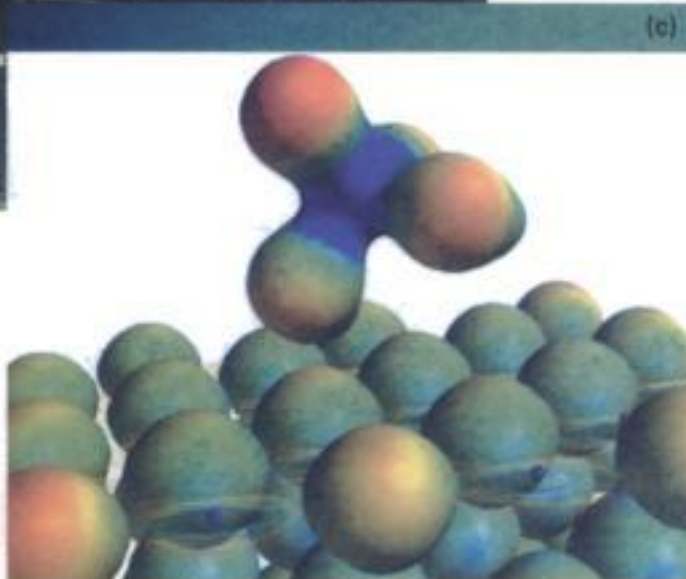
Cortesía de la NASA



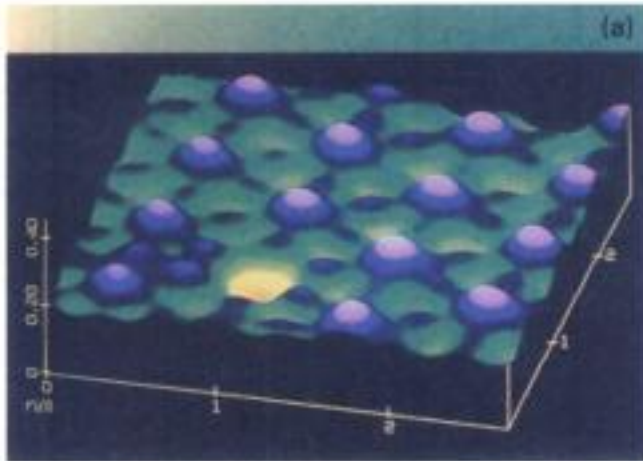
Astrid & Hanns-Frieder Michler/Science Photo Library

Se usan computadoras para diseñar, seleccionar y crear nuevos materiales y componentes antes de su desarrollo final en el laboratorio o en la industria. La imagen **(c)** muestra un ion arseniato siendo absorbido en la superficie de un óxido, fue generada por computadora mediante una forma de modelado de

mecánica cuántica. En Sandia, los investigadores prueban materiales nuevos llamados sorbentes nanodiseñados para aniones específicos (SANS, de *Specific Anion Nanoengineered Sorbents*). Para crearlos, se seleccionan familias de minerales cuyas afinidades hacia los aniones se conocen, y a continuación se usa el modelado con supercomputadora para simular con rapidez las aptitudes de captura de arsénico de miles de combinaciones y variaciones de los minerales.



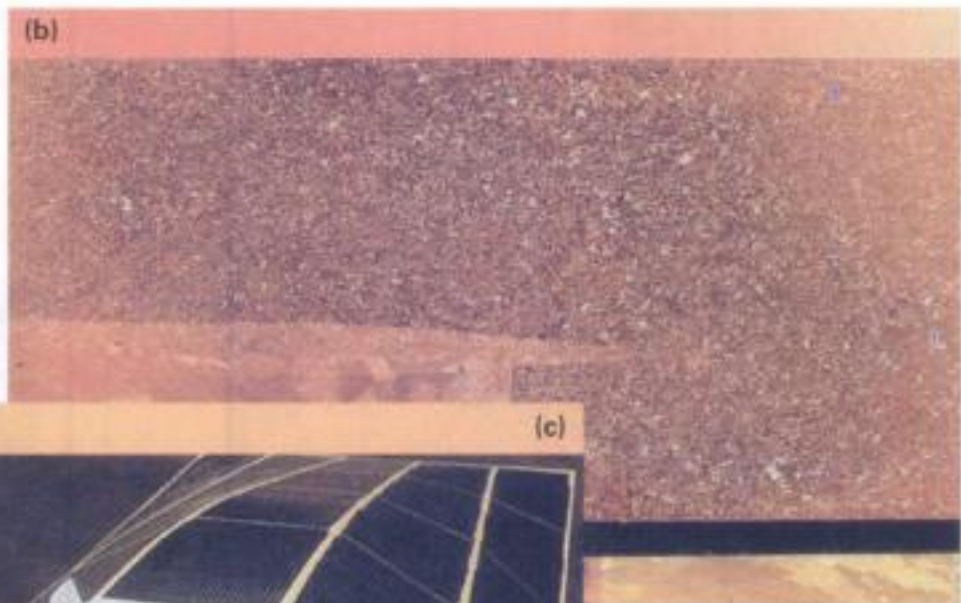
Fotografía e información cortesía de Sandia National Laboratories



Cortesía del Dr. Bruce C. Schardt, Digital Instruments

ALEACIONES DE SOLUCIÓN SÓLIDA

La estructura, incluso a escala atómica, es vital para obtener las propiedades de los materiales. Una micrografía electrónica de rastreo en un túnel electrónico revela un átomo faltante, es decir, una vacancia (descrita en el capítulo 4) en el recubrimiento de una superficie de cristal de platino **(a)**. Las aleaciones de solución sólida que se desea que desarrollen buena conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión, como el cobre, se diseñan con frecuencia para que tengan un mínimo de estos defectos, permitiendo así su fácil unión, como en la soldadura por haz electrónico, utilizada para producir un contenedor de desechos nucleares **(b)**.



Cortesía de General Motors



PTR-Precision Technologies

Por otra parte, la presencia de esos defectos puntuales posibilita controlar las propiedades de los materiales semiconductores (capítulos 18 y 20), como los utilizados para fabricar las celdas solares que proporcionan energía Sunraycer **(c)**.

ÁLABES DE TURBINA FUNDIDOS POR REVESTIMIENTO O A LA CERA PERDIDA

La estructura de una fundición por revestimiento solidificada direccionalmente puede producir granos columnares altamente orientados **(a)** con comportamiento anisotrópico, como se describe en el capítulo 8. Al controlar el proceso de solidificación pueden producirse álabes de turbina que sólo contengan estos granos columnares **(b, álabe central)**, obteniendo una mejora en resistencia, en comparación con el álabe equiaxial **(b, izquierda)**.



(a)

Cortesía de Howmet Corporation



(b)

Cortesía de Howmet Corporation

Cortesía de CFM Corporation



Cortesía de GE Aircraft Engines

Se pueden obtener mejores rendimientos si se producen álabes de un solo cristal **(b, arriba, derecha)**. Estos álabes se utilizan en el ensamble de motores de turbinas de alto rendimiento para aeronaves comerciales y militares **(c)**.



(c)

(a)



Cortesía de Dupont

TEJIDOS DE POLÍMEROS

La producción y el uso de fibras son aplicaciones importantes de los materiales polímeros, tanto en forma de tejidos como de refuerzo en materiales compuestos (capítulos 15 y 16). El Kevlar, por su resistencia y tenacidad, es una fibra de polímero de ingeniería de uso común que, mediante un diseño apropiado en la orientación de sus fibras, como en este tejido laminado en capas en X **(a)**, se puede adaptar para resistir esfuerzos específicos durante el uso.

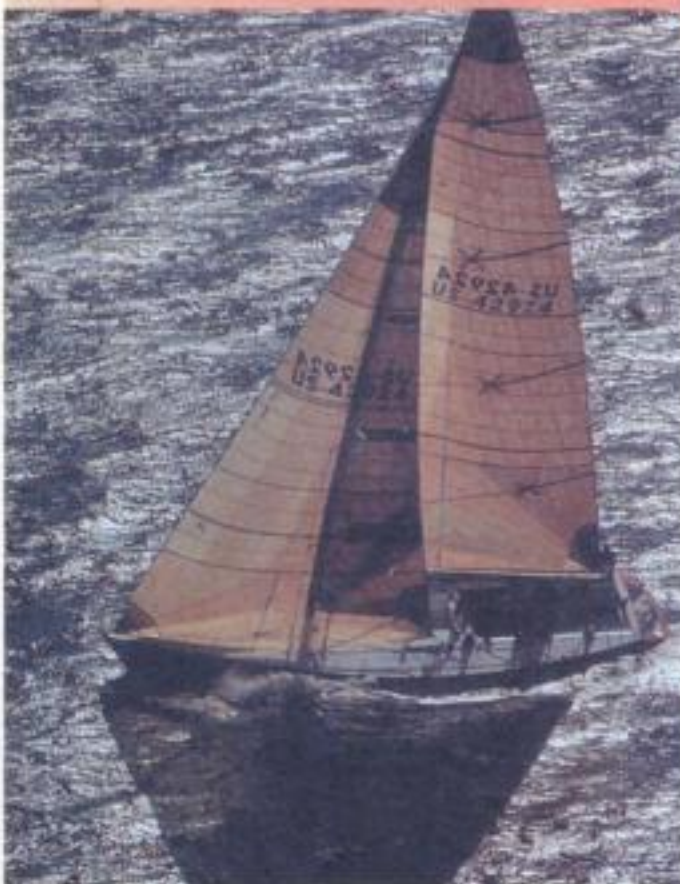
Cortesía de Dupont

(b)



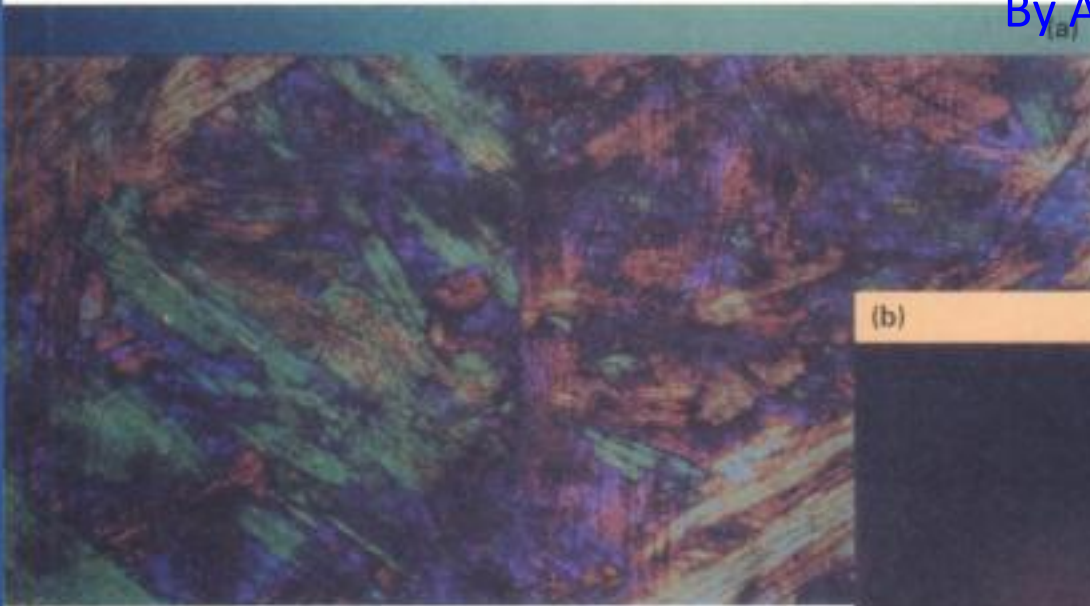
Cortesía de Dupont

(c)



Las fibras de Kevlar se producen en carretes **(b, arriba)** similares a los utilizados en la industria del vestido y se tejen para formar una tela.

Después, esas telas pueden utilizarse en aplicaciones aeroespaciales, en chalecos antibalas y como velas ligeras, resistentes y de alto rendimiento para los yates de competencia **(c)**.



Cortesía de la NASA

(b)



Cortesía de Corning Inc.

MATERIALES CERÁMICOS

Los materiales cerámicos avanzados a menudo requieren de un proceso complicado para producir estructuras y propiedades deseables (capítulo 14). La microestructura de la vitrocerámica que se usa con frecuencia en vajillas y baterías de cocina **(a)** requiere un tratamiento térmico de varios pasos para permitir una precipitación controlada de una fase cristalina a partir de una matriz vítrea. Partiendo de una región angosta de cerámico líquido fundido por láser, pueden solidificarse filamentos monocristalinos de Al_2O_3 para uso como refuerzo en compuestos de alta temperatura, basados en compuestos intermetálicos **(b)**.

Cortesía de Textron

(c)



Productos como los álabes de motor fabricados de nitruro de silicio y reforzados con filamentos de carburo de silicio **(c)** aprovechan las buenas propiedades, a altas temperaturas, que se obtienen con estas estructuras y procesos exóticos.



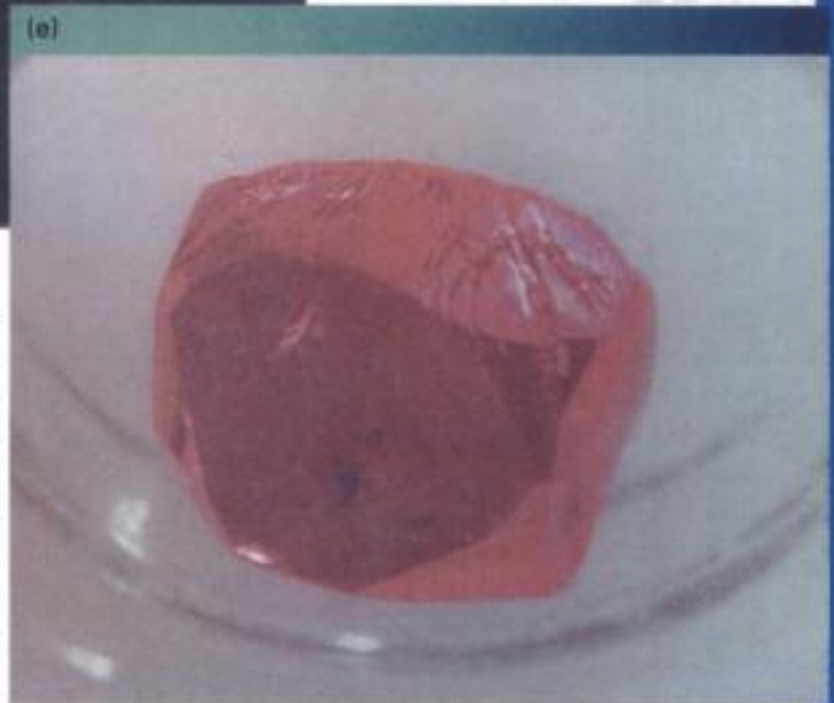
El transbordador espacial de la NASA **(d)** usa materiales metálicos, cerámicos y poliméricos altamente sofisticados. Estos materiales se diseñan y fabrican para que funcionen con seguridad en los ambientes extremos del espacio, y también para que sobrevivan a las altas temperaturas que se desarrollan a la entrada en la atmósfera terrestre.

FOTÓNICA

Aunque la mayor parte de los materiales diseñados son policristalinos, en muchas aplicaciones relacionadas con la microelectrónica y la fotónica se necesitan monocristales.

Cortesía de la NASA

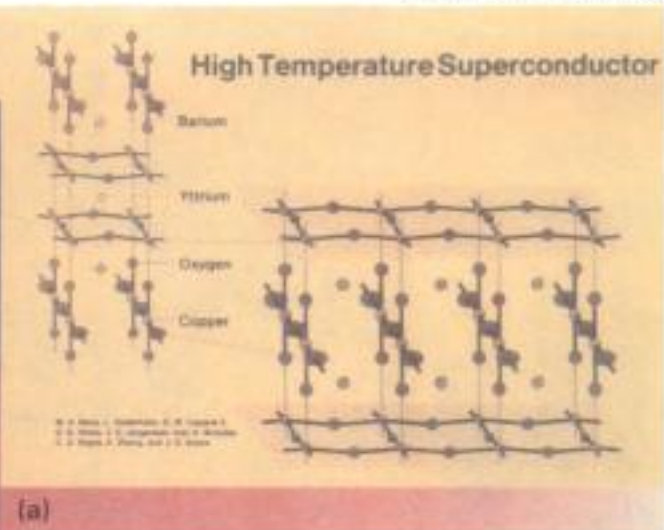
Como ejemplos de materiales que se usan en forma de monocristal están el silicio, el arseniuro de galio y el niobato de litio. El crecimiento de esos cristales se obtiene normalmente por solidificación de los materiales fundidos, o a partir de la fase vapor. Esta fotografía **(e)** muestra un monocristal de yoduro mercúrico, crecido en condiciones de microgravedad, en la Instalación de Cultivo de Cristales en Vapor/Sistema de Experimentos con



Cortesía de la NASA

Fluidos de la NASA. El material fuente se calentó, evaporó y transportó a un cristal semilla, donde se condensó el vapor. Los cristales de yoduro mercúrico tiene usos prácticos, como detectores sensibles de rayos X y rayos gamma. Además de sus excelentes propiedades ópticas, estos cristales pueden trabajar a temperatura ambiente, lo que los hace útiles en los detectores portátiles para vigilancia de centrales nucleares, prospección de recursos naturales, aplicaciones biomédicas y observaciones astronómicas.

Cortesía de la Nasa



SUPERCONDUCTORES

La estructura cristalina compleja del material cerámico de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, contribuye a la superconducción a altas temperaturas del material **(a)** como se analiza en el capítulo 18. Esta estructura excluye los campos magnéticos del material (efecto Meissner) permitiendo que las corrientes eléctricas fluyan sin resistencia y generando que una muestra de superconductor quede en levitación sobre un imán permanente **(b)**.

Los discos duros magnéticos, con densidades de 35 a 100 Gbit/pulg² en el área, son posibles hoy gracias a los avances en el procesamiento de materiales magnéticos y en el desarrollo de nuevos dispositivos, como los gigantes sensores de magnetorresistencia (GMR).

Los discos duros magnéticos **(c)** representan un sistema fascinante y complejo en el que se emplean materiales complicados, magnéticamente duros y suaves. La tendencia en la industria es hacia el aumento de la cantidad de información que se pueda almacenar por unidad de área.

El desafío es hacer más pequeños los granos de los materiales magnéticos, sin perder en el proceso el comportamiento magnético.



Cortesía de Seagate Corporation

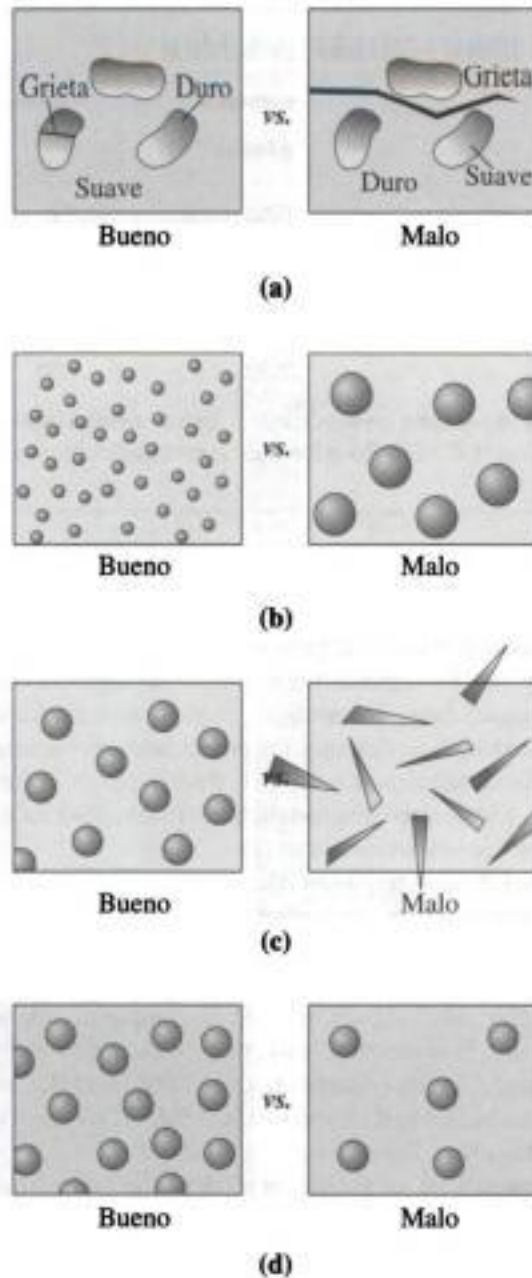


Figura 10-1 Consideraciones para tener un endurecimiento efectivo por dispersión: (a) La fase precipitada debe ser dura y discontinua, (b) las partículas de la fase dispersa deben ser pequeñas y numerosas, (c) las partículas de la fase dispersa deben ser redondas y no aciculares y d) mayores cantidades de la fase dispersa aumentan el endurecimiento.

10-2

Compuestos intermetálicos

Un **compuesto intermetálico** está formado por dos o más elementos metálicos que producen una nueva fase con su composición, estructura cristalina y características propias. Los compuestos intermetálicos o simplemente "los intermetálicos" casi siempre son muy duros y frágiles; se parecen a los materiales cerámicos en sus propiedades mecánicas; sin embargo, se forman

TABLA 10-1 ■ *Propiedades de algunos compuestos intermetálicos*

Compuesto intermetálico	estructura cristalina	temperatura de fusión (°C)	Densidad ($\frac{g}{cm^3}$)	Módulo de Young (GPa)
FeAl	BCC ordenada	1250–1400	5.6	263
NiAl	FCC ordenada (B2)*	1640	5.9	206
Ni ₃ Al	FCC ordenada (L1 ₂)*	1390	7.5	337
TiAl	Tetragonal ordenada (L1 ₀)*	1460	3.8	94
Ti ₃ Al	HCP ordenada	1600	4.2	210
MoSi ₂	Tetragonal	2020	6.31	430

* Llamada también. (Fuente: Adaptado de Mechanical Behavior of Materials, por M.A. Meyers y K.K. Chawla. Copyright © 1998 Prentice Hall. Reproducido con autorización de Pearson Education.)

al combinar dos o más elementos metálicos. Nuestro interés en los intermetálicos es doble. En primer lugar, las aleaciones endurecidas por dispersión contienen con frecuencia un compuesto intermetálico como fase dispersa. En segundo lugar, muchos compuestos intermetálicos, por mérito propio y no como segunda fase, se investigan y desarrollan para aplicaciones en alta temperatura.[2-4] En esta sección, describiremos las propiedades de los intermetálicos como materiales independientes. En las siguientes secciones, describiremos la forma en que las fases intermetálicas fortalecen a los materiales metálicos. La tabla 10-1 es un resumen de las propiedades de algunos compuestos intermetálicos.[1]

Los **compuestos intermetálicos estequiométricos** tienen una composición fija. Frecuentemente, los aceros se endurecen mediante un compuesto estequiométrico llamado carburo de hierro o cementita (Fe_3C) que tiene una relación fija de tres átomos de hierro por cada átomo de carbono. Los compuestos intermetálicos estequiométricos se representan en el diagrama de fases con una recta vertical [Fig. 10-2(a)]. Un ejemplo de compuesto intermetálico útil es el disiliciuro de molibdeno, $MoSi_2$. Este material se usa para fabricar elementos de calentamiento de hornos de alta temperatura. A temperaturas altas (~1000 a 1600 °C), el $MoSi_2$ tiene una notable resistencia a la oxidación. A bajas temperaturas (~500 °C o menos), el $MoSi_2$ es frágil y sufre una oxidación catastrófica llamada peste.[1]

Los **compuestos intermetálicos no estequiométricos** tienen un intervalo de composiciones, y a veces se les llama **soluciones sólidas intermedias**. En el sistema molibdeno-rodio, la fase γ es un compuesto intermetálico no estequiométrico [Fig. 10-2(b)]. Como la relación de átomos de molibdeno a rodio no es fija, la fase γ puede contener de 45 a 83% en peso de Rh a 1600 °C. La precipitación del aluminuro de cobre $CuAl_2$ intermetálico no estequiométrico causa el fortalecimiento de varias aleaciones importantes de aluminio (Fig. 11-5).[4]

Propiedades y aplicaciones de los intermetálicos Los intermetálicos como Ti_3Al y Ni_3Al mantienen su resistencia e incluso desarrollan una ductilidad útil a temperaturas elevadas (Fig. 10-3). Sin embargo, la baja ductilidad ha impedido más desarrollo de esos materiales. Se ha demostrado que la adición de pequeñas concentraciones de boro (B, hasta 0.2%) puede aumentar la ductilidad del Ni_3Al policristalino. Es posible que los efectos ambientales tengan también su papel en la limitación de la ductilidad en los intermetálicos.[3,6] Mayores valores de ductilidad harían posible el uso de intermetálicos en muchas aplicaciones con alta temperatura y grandes cargas. Los compuestos ordenados de NiAl y Ni_3Al también son candidatos para aviones supersónicos, motores de reacción y aviones comerciales

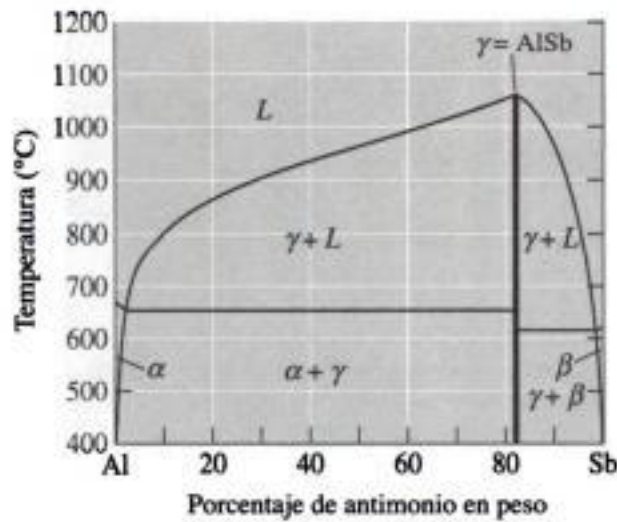
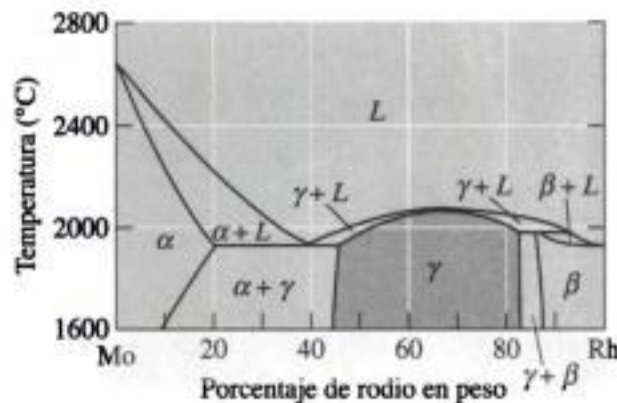


Figura 10-2 (a) En el diagrama de fases aluminio-antimonio hay un compuesto intermetálico estequiométrico γ . (b) En el diagrama de fases molibdeno-rodio hay un compuesto intermetálico no estequiométrico γ .



de gran velocidad.[4] No todas las aplicaciones de los intermetálicos son estructurales. Los intermetálicos a base de silicio, como siliciuro de platino, por ejemplo, desempeñan una función útil en la microelectrónica, y ciertos intermetálicos, como el Nb_3Sn , son muy útiles como superconductores (capítulo 18).

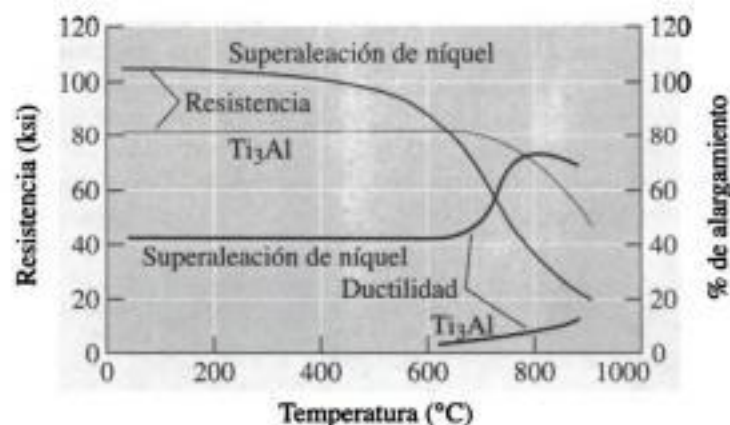


Figura 10-3 Resistencia y ductilidad del compuesto intermetálico Ti_3Al en comparación con las de una superaleación convencional de níquel. El Ti_3Al mantiene su resistencia a mayores temperaturas durante más tiempo que la superaleación de níquel.

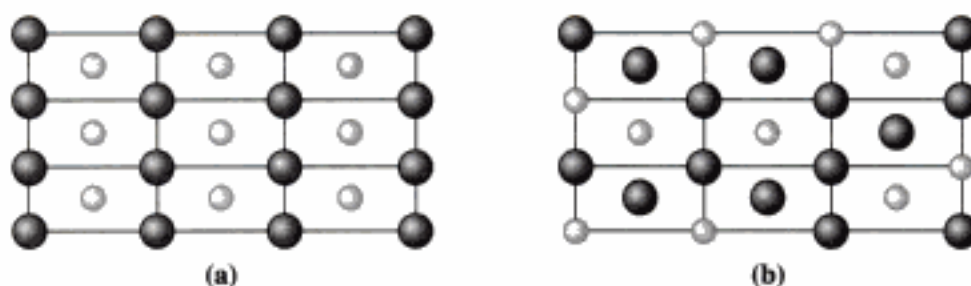


Figura 10-4 (a) En una estructura ordenada, los átomos sustituyentes ocupan puntos de red específicos, (b) mientras que en la estructura normal, los átomos constituyentes tienen ubicaciones aleatorias en distintos sitios de la red.

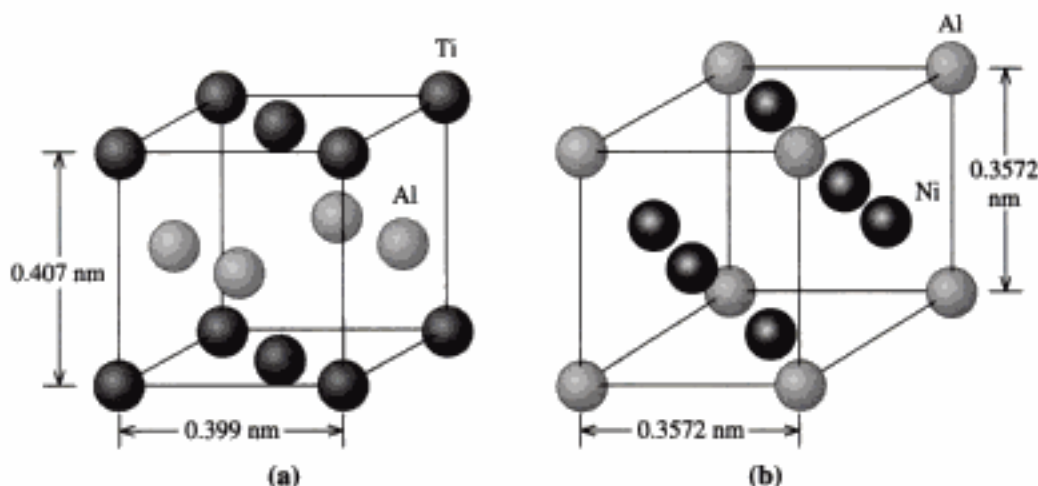


Figura 10-5 Celdas unitarias de dos compuestos intermetálicos: (a) el TiAl tiene una estructura tetragonal ordenada, y (b) el Ni_3Al tiene una estructura cúbica ordenada.

Los aluminuros de titanio, TiAl, llamados también aleación gamma (γ), y el Ti_3Al , la aleación α_2 , se consideran para una diversidad de aplicaciones que incluyen motores de turbina de gas. Estos compuestos tienen **estructuras cristalinas ordenadas**; en la estructura ordenada, los átomos de Ti y de Al ocupan lugares específicos de la estructura cristalina, y no lugares aleatorios, como en la mayoría de las soluciones sólidas (Fig. 10-4). En la estructura tetragonal ordenada del TiAl (Fig. 10-5), los átomos de titanio están en los puntos de red de las esquinas y en las caras superior e inferior de la celda unitaria, mientras que los átomos de aluminio sólo están en las otras caras de la celda. La estructura ordenada dificulta el movimiento de las dislocaciones y ocasiona baja ductilidad a bajas temperaturas, pero también produce una alta energía de activación para la difusión y buena resistencia a la termofluencia a temperaturas elevadas.[1] El siguiente ejemplo ilustra las consideraciones que pueden ser importantes en la selección de materiales como los intermetálicos para diversas aplicaciones.

EJEMPLO 10-1 Selección de materiales para un vehículo aeroespacial

Diseñe un material adecuado para las partes de un vehículo aeroespacial que alcance altas temperaturas al reingresar a la atmósfera terrestre.

SOLUCIÓN

El material debe resistir las altas temperaturas que se generan cuando el vehículo entra a la atmósfera terrestre, cuando el material está expuesto al oxígeno. Durante la entrada, la temperatura del material podría llegar hasta 1600 o 1700 °C.[4] Se necesita cierta ductilidad para proporcionar tolerancia del vehículo contra los daños. Por último, el material debería tener una baja densidad para minimizar el peso del vehículo. El requisito de la ductilidad sugiere el uso de una aleación metálica. Los metales a alta temperatura que podrían considerarse incluyen al tungsteno (densidad 19.254 g/cm³), al níquel (densidad 8.902 g/cm³) y al titanio (densidad 4.507 g/cm³). El tungsteno y el níquel son bastante densos y, como veremos en un capítulo posterior, el titanio tiene mala resistencia a la oxidación a alta temperatura. Dada su capacidad de resistir a la oxidación a altas temperaturas, un compuesto intermetálico para alta temperatura podría ser una solución. El TiAl y el Ni₃Al tienen buenas propiedades de resistencia a altas temperaturas y a la oxidación, y a altas temperaturas, tienen al menos algo de ductilidad. Podemos estimar sus densidades a partir de sus estructuras cristalinas.

Los parámetros de red de la celda unitaria tetragonal centrada en las caras de TiAl son $a_0 = 3.99 \times 10^{-8}$ cm y $c_0 = 4.07 \times 10^{-8}$ cm (Fig. 10-5). Hay dos átomos de titanio y dos de aluminio en cada celda unitaria. Por consiguiente:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{TiAl}} &= \frac{\left(\begin{array}{c} \text{Masa de átomos de Ti} \\ \text{por celda unitaria} \end{array} + \begin{array}{c} \text{Masa de átomos de Al} \\ \text{por celda unitaria} \end{array} \right)}{\text{Volumen de la celda unitaria de TiAl}} \\ &= \frac{(2 \text{ átomos de Ti}) \left(\begin{array}{c} \text{Masa atómica} \\ \text{de Ti} \end{array} \right)}{N_{\text{AV}}} + \frac{(2 \text{ átomos de Al}) \left(\begin{array}{c} \text{Masa atómica} \\ \text{de Al} \end{array} \right)}{N_{\text{AV}}} \\ &= \frac{(2) \left(47.9 \frac{\text{gm}}{\text{mol}} \right) + (2) \left(26.981 \frac{\text{gm}}{\text{mol}} \right)}{(6.023 \times 10^{23}) \cdot (3.99 \times 10^{-8} \text{ cm})^2 (4.07 \times 10^{-8} \text{ cm})} \\ \rho_{\text{TiAl}} &= 3.84 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \end{aligned}$$

El parámetro de red para el Ni₃Al es 3.572×10^{-8} cm [Fig. 10-5(b)]; cada celda unitaria contiene tres átomos de níquel y uno de aluminio:

$$\rho_{\text{Ni}_3\text{Al}} = \frac{(3\text{Ni}) \left(58.71 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right) + (1\text{Al}) \left(26.981 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)}{(3.572 \times 10^{-8} \text{ cm})^3 \left(6.02 \times 10^{23} \frac{\text{átomos}}{\text{mol}} \right)} = 7.40 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

El TiAl solamente tiene más o menos la mitad de la densidad que el Ni₃Al. Sin embargo, la resistencia específica (relación del módulo de Young entre la densidad) es mayor para el Ni₃Al (véase la tabla 10-1). Así, la elección podría ser Ni₃Al, aunque deberán tenerse en cuenta otras propiedades y otros asuntos de procesamiento.

El interés en esos materiales para su uso en el espacio exterior se debe a su rigidez, y no a su resistencia. Así, los materiales compuestos con fibras de carbono o de aramidas en una matriz (basada en KevlarTM), recubierta en forma adecuada para protegerlos de la oxidación, también serían muy buenas elecciones para aplicaciones en el espacio exterior.[7] Además de las propiedades sencillas que se consideraron aquí, los mate-

riales fabricados que se usen en viajes espaciales deberán resistir efectos como radiación, desgasificación de los materiales y las descargas corona resultantes, el efecto del oxígeno atómico (presente en órbitas terrestres bajas) sobre la corrosión por oxidación, el impacto de basura espacial y los esfuerzos debidos a la dilatación y contracción térmicas, que causan fatiga (capítulo 6).[4]

10-3 Diagramas de fases que contienen reacciones entre tres fases

Muchos sistemas binarios producen diagramas de fases más complicados que los diagramas de fases isomorfas que se describieron en el capítulo 9. Los sistemas que describiremos aquí tienen reacciones donde intervienen tres fases separadas. En la figura 10-6 se definen cinco de esas reacciones. Cada una de ellas puede identificarse en un diagrama de fases con el siguiente procedimiento:

1. Localizar una recta horizontal en el diagrama de fases. La línea horizontal, que indica una reacción de tres fases, representa la temperatura a la que se efectúa la reacción bajo condiciones de equilibrio.
2. Ubicar tres puntos distintos en la línea horizontal: los dos extremos y un tercer punto, entre los dos extremos de la recta horizontal. Este tercer punto representa la composición a la que sucede la reacción entre tres fases. En la figura 10-6, el punto intermedio se muestra en el centro. Sin embargo, en un diagrama real de fases, este punto no necesariamente es el central.
3. Ver inmediatamente arriba del punto intermedio e identificar la o las fase(s) presente(s); ver inmediatamente abajo del punto intermedio e identificar la fase o fases presentes. Entonces, escribir la reacción a partir de la o las fase(s) arriba del punto intermedio, que se transforman en la o las fase(s) abajo del punto. Compare esta reacción con las de la figura 10-6 para identificar la reacción.

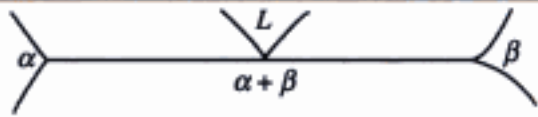
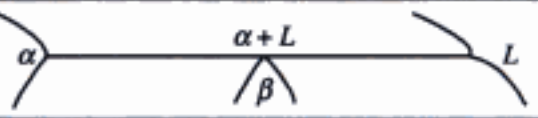
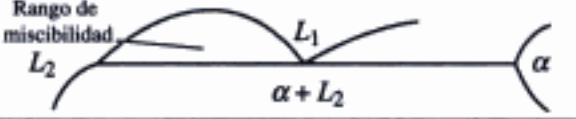
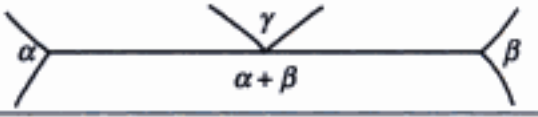
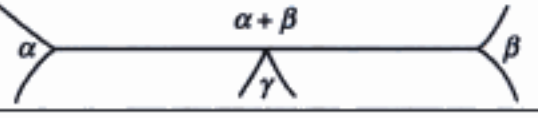
Eutéctica	$L \rightarrow \alpha + \beta$	
Peritética	$\alpha + L \rightarrow \beta$	
Monotética	$L_1 \rightarrow L_2 + \alpha$	
Eutectoide	$\gamma \rightarrow \alpha + \beta$	
Peritectoide	$\alpha + \beta \rightarrow \gamma$	

Figura 10-6 Las cinco reacciones de tres fases más importantes en los diagramas binarios de fases.

EJEMPLO 10-2 Identificación de reacciones entre tres fases

Revise el diagrama binario de fases de la figura 10-7. Identifique las reacciones que ocurren entre tres fases.

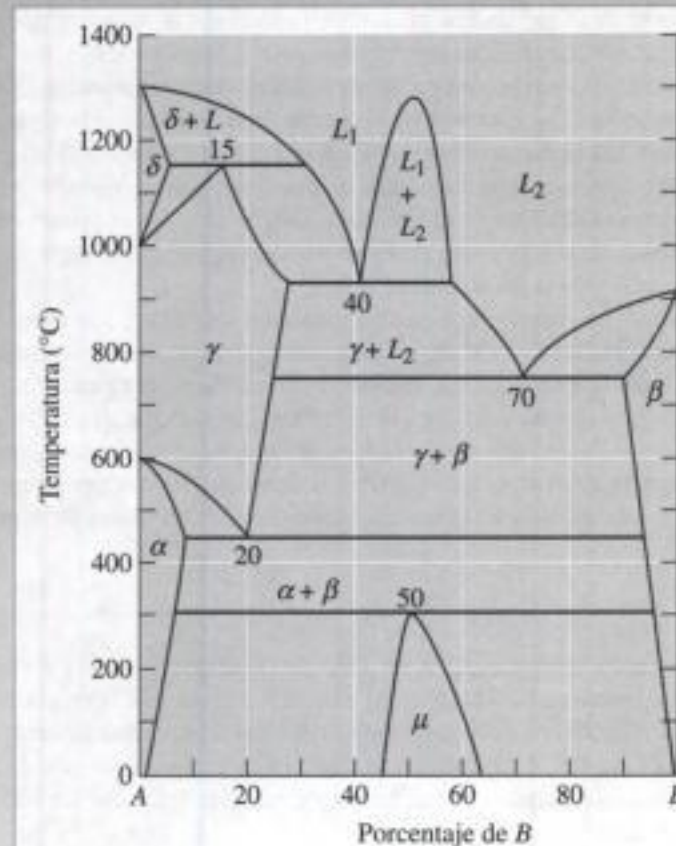


Figura 10-7 Diagrama de fases hipotético (para el ejemplo 10-2).

SOLUCIÓN

Encontramos líneas horizontales a 1150, 920, 750, 450 y 300 °C:

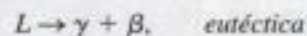
1150 °C: el punto intermedio está en 15% de B. Sobre el punto están presentes $\delta + L$, y abajo está presente γ . La reacción es



920 °C: esta reacción se efectúa con 40% de B:



750 °C: esta reacción se efectúa a 70% de B:



450 °C: esta reacción se efectúa con 20% de B:



300 °C: esta reacción se efectúa con 50% de B:



Las reacciones **eutéctica**, **peritética** y **monotética** son parte del proceso de solidificación. Las aleaciones que se usan para vaciar o soldar aprovechan con frecuencia el bajo punto de fusión de la reacción eutéctica. El diagrama de fases de las aleaciones monotéticas contiene un domo, o **rango de miscibilidad**, en el que coexisten dos fases líquidas. En el sistema cobre-plomo, la reacción monotética produce diminutos glóbulos de plomo dispersos que mejoran la facilidad de maquinado de la aleación de cobre. Las reacciones peritéticas conducen a la solidificación en desequilibrio y a la segregación.

En muchos sistemas hay un **rango de miscibilidad metaestable**. [8,9] En este caso, el domo de inmiscibilidad se extiende en la región de sublíquidos. En algunos casos, todo el rango de miscibilidad es metaestable; es decir, el domo de inmiscibilidad está totalmente bajo el líquido. Estos sistemas forman materiales como los vidrios Vycor™ y Pyrex™, que también se conocen como vidrios de fases separadas. [10] R. Roy fue el primer científico que describió la ciencia básica de la formación de esos vidrios, usando el concepto de un rango de miscibilidad metaestable abajo del líquido. [11]

Las reacciones **eutectoide** y **peritectoide** son totalmente reacciones en estado sólido. La reacción eutectoide forma la base del tratamiento térmico de varios sistemas de aleaciones que incluyen al acero (capítulo 11). La reacción peritectoide es de extrema lentitud, y con frecuencia produce estructuras indeseables y en desequilibrio, en las aleaciones. Como se dijo en el capítulo 5, la velocidad de difusión de los átomos en los sólidos es mucho menor que en los líquidos.

Cada una de estas reacciones entre tres fases sucede a temperatura y composición fijas. La regla de las fases de Gibbs para una reacción entre tres fases es, a presión constante:

$$1 + C = F + P \quad (10-1)$$

$$F = 1 + C - P = 1 + 2 - 3 = 0$$

ya que hay dos componentes C en un diagrama binario de fases, y en la reacción intervienen tres fases P . Cuando las tres fases están en equilibrio durante la reacción, no hay grados de libertad. En consecuencia, esas reacciones se llaman invariantes. La temperatura y la composición de cada fase que interviene en la reacción entre tres fases son fijas. Obsérvese que de estas cinco reacciones que se describen aquí, sólo las reacciones eutéctica y eutectoide pueden causar endurecimiento por dispersión.

104

El diagrama de fases eutécticas

El sistema plomo-estaño (Pb-Sn) contiene sólo una reacción eutéctica simple (Fig. 10-8). Este sistema de aleación es la base de la mayoría de las aleaciones comunes que se usan para soldar con estaño. Como se mencionó antes, debido a la toxicidad del Pb, actualmente se realiza un gran esfuerzo para reemplazarlo en las soldaduras Pb-Sn. [12,13] No obstante, continuaremos usando un sistema Pb-Sn como una forma conveniente de explicar el diagrama de fases eutécticas. Examinaremos cuatro clases de aleaciones en este sistema.

Aleaciones de solución sólida Las aleaciones que contienen de 0 a 2% de Sn se comportan exactamente igual que las aleaciones de cobre-níquel; se forma una solución sólida, de una fase α , durante la solidificación (Fig. 10-9). Estas aleaciones se endurecen mediante endurecimiento por solución sólida, a través de endurecimiento por deformación y controlando el proceso de solidificación para refinar la estructura de grano.

Aleaciones que rebasan el límite de solubilidad Las aleaciones que contienen entre 2 y 19% de Sn también solidifican y producen una solución sólida α . Sin embargo, al continuar enfriándose la aleación, se lleva a cabo una reacción en estado sólido, que permite que una segunda fase sólida (β) precipite de la fase α original (Fig. 10-10).

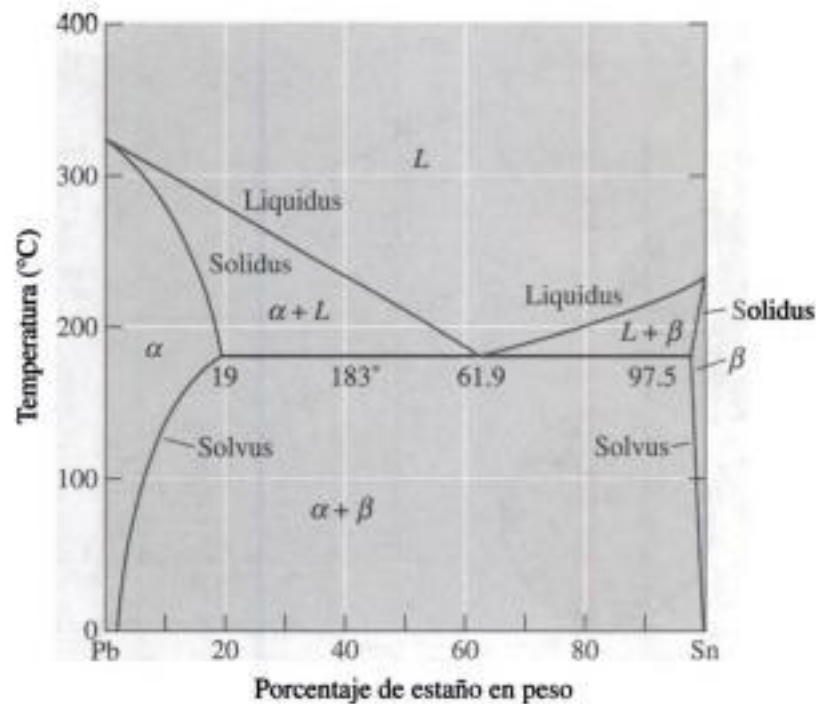


Figura 10-8 Diagrama de fases en equilibrio para plomo-estaño.

En este diagrama de fases, la α es una solución sólida de estaño en plomo. Sin embargo, la solubilidad del estaño en el sólido α es limitada. A 0°C sólo se puede disolver 2% de Sn en α . Al aumentar la temperatura, se disuelve más estaño en el plomo hasta que, a 183°C , aumenta esa solubilidad a 19% de Sn. Ésta es la solubilidad máxima del estaño en el plomo. La

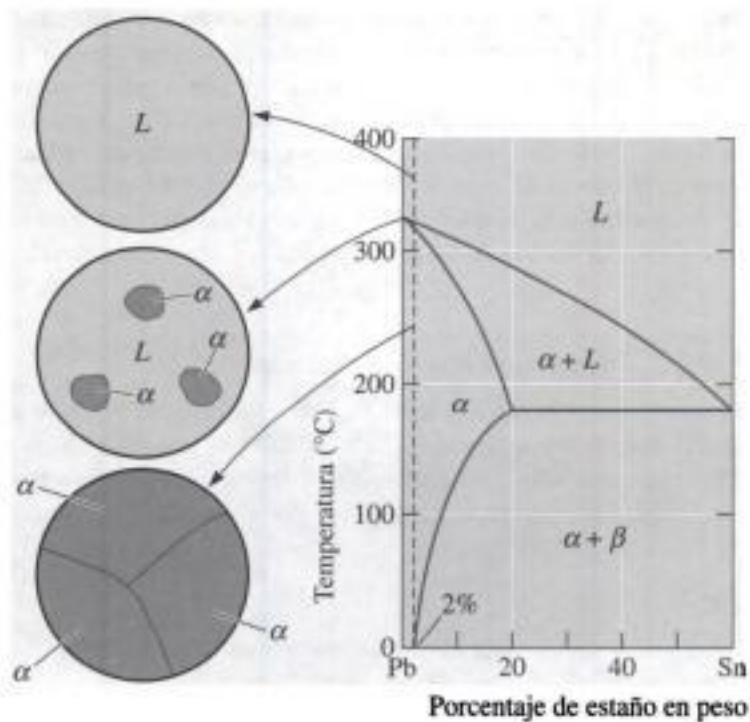


Figura 10-9 Solidificación y microestructura de una aleación Pb-2% Sn. Esta aleación es una solución de una sola fase.

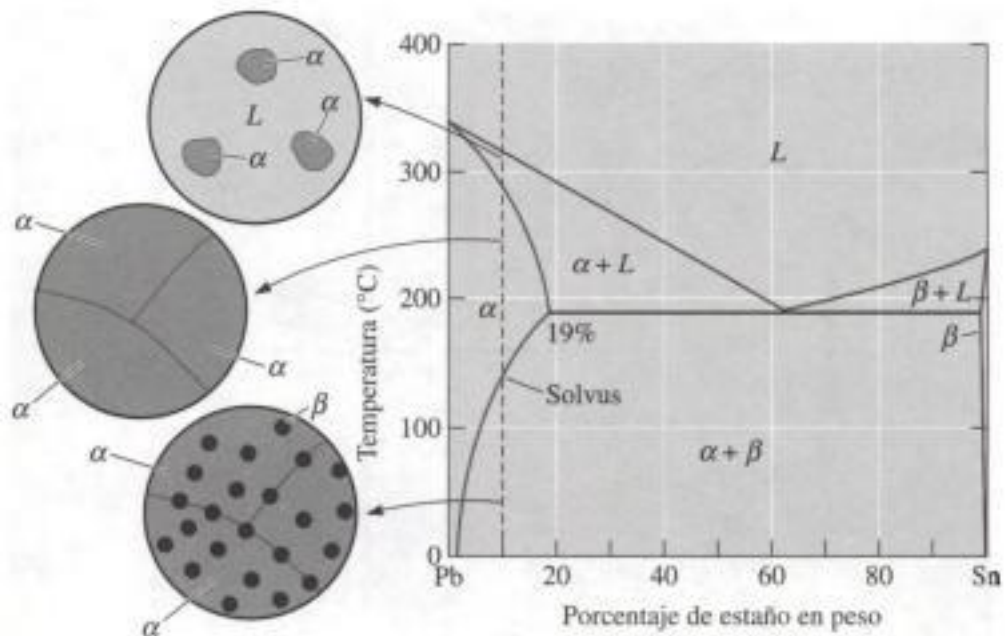


Figura 10-10 Solidificación, precipitación y microestructura de una aleación Pb-10% Sn. Algo de endurecimiento por dispersión ocurre conforme se precipita el sólido β .

solubilidad del estaño en el plomo sólido en cualquier temperatura se indica en la **curva solvus**. Toda aleación que contiene entre 2 y 19% de Sn se enfría y pasa por solvus, se rebasa el límite de solubilidad y se forma una pequeña cantidad de β .

Las propiedades de esta clase de aleaciones se controlan con varias técnicas, que incluyen el endurecimiento de la porción α de la estructura por solución sólida, controlando la microestructura producida durante la solidificación y controlando la cantidad y características de la fase β . Estas clases de composiciones, que forman una sola fase sólida a altas temperaturas y dos fases sólidas a menores temperaturas, son adecuadas para endurecerlas por envejecimiento o precipitación. En el capítulo 11, veremos cómo los procesos fuera de equilibrio son necesarios para fabricar aleaciones endurecidas por precipitación. Un diagrama de componentes, como el de la figura 10-10, que muestra una composición específica, se llama **isopleta**. [9] La determinación de las reacciones que se llevan a cabo en el enfriamiento de determinada composición se llama **estudio de isopleta(s)**. El siguiente ejemplo ilustra cómo se pueden hacer ciertos cálculos en relación con la composición de las fases y sus concentraciones relativas.

EJEMPLO 10-3 Fases en el diagrama plomo-estaño (Pb-Sn)

Determine a) la solubilidad del estaño en plomo sólido a 100 °C, b) la solubilidad máxima del plomo en el estaño sólido, c) la cantidad de β que se forma si una aleación Pb-10% Sn se enfría a 0 °C, d) las masas de estaño contenido en las fases α y β y e) la masa de plomo contenido en las fases α y β . Suponga que la masa total de la aleación Pb-10% Sn es de 100 gramos.

SOLUCIÓN

El diagrama de fases que necesitamos se muestra en la figura 10-10. Todos los porcentajes son en peso.

a) La temperatura de 100 °C interseca la curva solvus en 5% Sn. La solubilidad del estaño (Sn) en el plomo (Pb) a 100 °C es, por consiguiente, 5%.

b) La solubilidad máxima del plomo (Pb) en el estaño (Sn), que se determina desde el lado rico en estaño del diagrama de fases, está en la temperatura eutéctica de 183 °C y es 97.5% Sn.

c) A 0 °C, la aleación con 10% de Sn está en la región $\alpha + \beta$ del diagrama de fases. Si trazamos una línea de enlace a 0 °C y se aplica la regla de la palanca, encontramos que

$$\% \beta = \frac{10 - 2}{100 - 2} \times 100 = 8.2\%$$

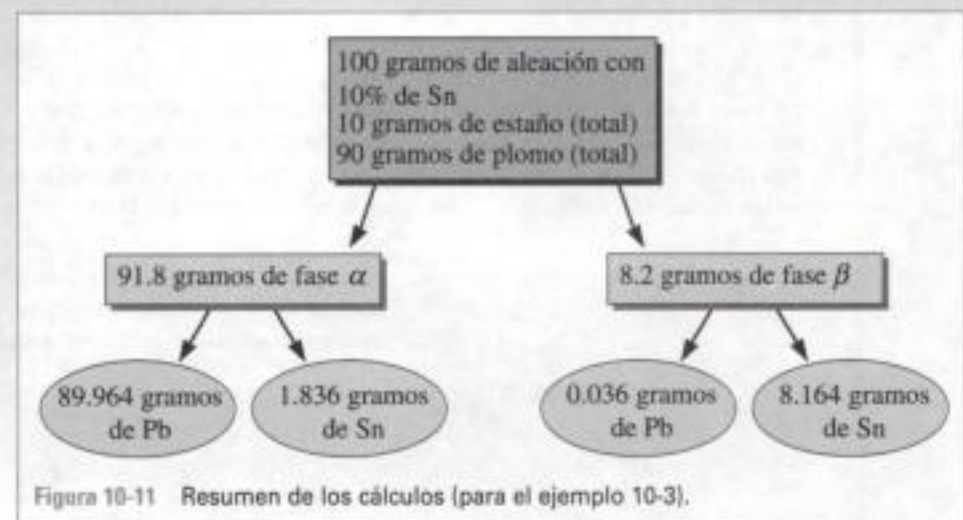
Obsérvese que la línea de enlace cruza la curva solvus de solubilidad de Pb en Sn (al lado derecho del campo de la fase β) a una concentración de Sn distinta de cero. Sin embargo, no se puede leer con exactitud en el diagrama. Por consiguiente, supondremos que el punto del lado derecho de la línea de enlace es 100% de Sn. El % de α sería $(100 - \% \beta) = 91.8\%$. Esto significa que si tenemos 100 g de la aleación con 10% de Sn consistirá en 8.2 g de la fase β , y en 91.8 g de la fase α .

d) Obsérvese que 100 g de la aleación consistirán en 10 g de Sn y 90 g de Pb. El Pb y el Sn se distribuyen en dos fases (es decir, α y β). La masa de Sn en la fase $\alpha = 2\% \text{ Sn} \times 91.8 \text{ g de fase } \alpha = 0.02 \times 91.8 \text{ g} = 1.836 \text{ g}$. Como el estaño (Sn) aparece tanto en la fase α como en la β la masa de Sn en la fase β será $(10 - 1.836) \text{ g} = 8.164 \text{ g}$. Obsérvese que en este caso la fase β a 0 °C es casi Sn puro.

e) Calculemos ahora la masa de plomo en las dos fases. La masa de Pb en la fase α será igual a la masa de la fase α menos la masa de Sn en esa fase $= 91.8 \text{ g} - 1.836 \text{ g} = 89.964 \text{ g}$. También podríamos haber calculado como sigue:

$$\begin{aligned} \text{Masa de Pb en la fase } \alpha &= 98\% \text{ Sn} \times 91.8 \text{ g de fase } \alpha = 0.98 \times 91.8 \text{ g} \\ &= 89.964 \text{ g} \end{aligned}$$

Conocemos la masa total del plomo, 90 g, y también la masa del plomo en la fase α ; por consiguiente, la masa de Pb en la fase $\beta = 90 - 89.964 = 0.036 \text{ g}$. Esto coincide con lo que dijimos antes, que la fase β en este caso es casi estaño puro. La figura 10-11 muestra un resumen de los cálculos que hicimos aquí.



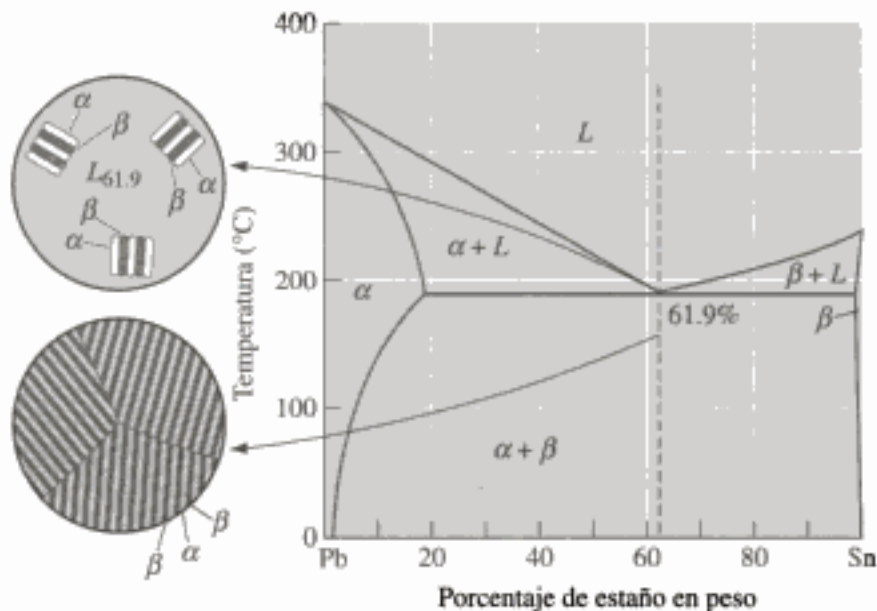


Figura 10-12 Solidificación y microestructura de la aleación eutéctica Pb-61.9% Sn.

Aleaciones eutécticas La aleación que contiene 61.9% de Sn tiene la composición eutéctica (Fig. 10-12). El término eutéctico proviene del griego *eutectos*, que significa fácilmente fusible. En realidad, en un sistema binario que tiene una reacción eutéctica, una aleación con la composición eutéctica tiene la temperatura mínima de fusión. Es la composición para la cual no hay intervalo de solidificación; la solidificación de esta aleación sucede a una temperatura, que en el sistema Pb-Sn es 183 °C. Arriba de 183 °C, la aleación es totalmente líquida y, en consecuencia, debe contener 61.9% de Sn. Cuando el líquido se enfría a 183 °C, comienza la reacción eutéctica:



Se forman dos soluciones sólidas, α y β durante la reacción eutéctica. Las composiciones de ambas soluciones se dan en los extremos de la línea eutéctica.

Durante la solidificación, el crecimiento del sólido eutéctico necesita tanto de la eliminación del calor latente de fusión como la redistribución, por difusión, de las dos distintas especies atómicas. Como la solidificación sucede por completo a 183 °C, la curva de enfriamiento (Fig. 10-13) se parece a la de un metal puro; esto es, se presenta una meseta térmica a la temperatura eutéctica. En el capítulo 8, habíamos dicho que las aleaciones se solidifican dentro de un intervalo de temperaturas (las temperaturas de liquidus y de solidus) conocido como intervalo de solidificación. Las composiciones eutécticas son excepciones a esta regla, porque pasan de líquido a sólido a temperatura constante, es decir, la temperatura eutéctica.

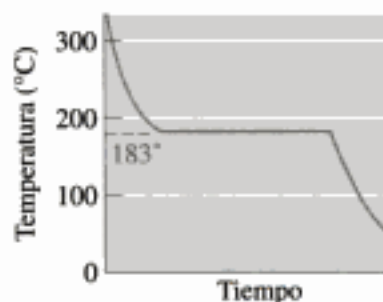


Figura 10-13 La curva de enfriamiento de una aleación eutéctica es una meseta térmica simple, porque los eutécticos se solidifican o se funden a una sola temperatura.

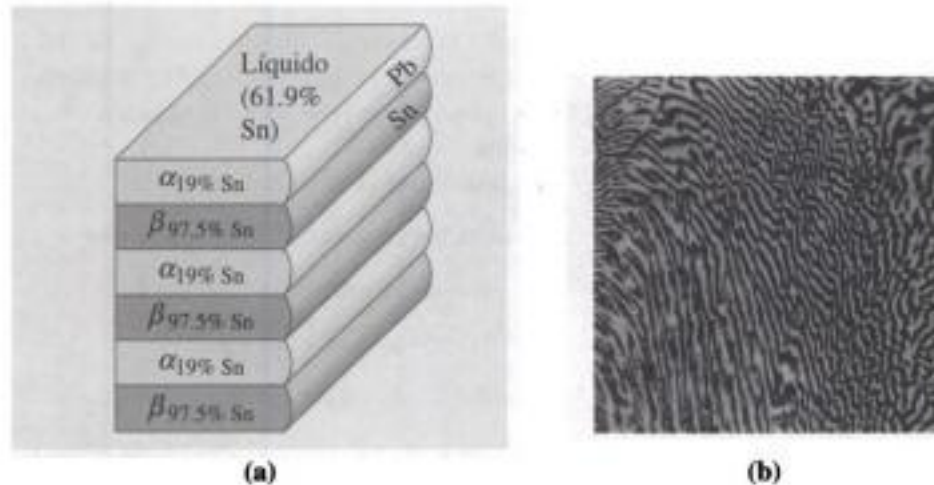


Figura 10-14 (a) Redistribución atómica durante el crecimiento lamelar de un eutéctico de plomo y estaño. Los átomos de estaño del líquido se difunden de preferencia hacia las placas β y los átomos de plomo se difunden hacia las placas α . (b) Fotomicrografía del microconstituyente eutéctico plomo-estaño (400 $\times$).

Cuando los átomos se redistribuyen durante la solidificación eutéctica, se desarrolla una microestructura característica. En el sistema plomo-estaño, las fases sólidas α y β crecen en el líquido en un arreglo **lamelar**, es decir en forma de laminillas (Fig. 10-14). La estructura lamelar permite que los átomos de plomo y estaño se muevan por el líquido, donde la difusión es rápida, sin tener que recorrer una distancia apreciable. Esta estructura lamelar es característica de muchos otros sistemas eutécticos.

El producto de la reacción eutéctica tiene un arreglo característico de las dos fases, llamado **microconstituyente eutéctico**. En la aleación Pb-61.9% Sn, se forma el 100% del microconstituyente eutéctico, porque todo el líquido participa en la reacción. En el siguiente ejemplo se indica cómo se puede calcular la cantidad de aleación eutéctica.

EJEMPLO 10-4 Cantidad de fases en la aleación eutéctica

a) Determine la cantidad y la composición de cada fase en una aleación plomo-estaño de composición eutéctica. b) Calcule la masa de las fases presentes. c) Calcule la cantidad de plomo y estaño en cada fase, suponiendo que tiene usted 200 g de la aleación.

SOLUCIÓN

a) La aleación eutéctica contiene 61.9% de Sn. Aplicamos la ley de la palanca a una temperatura justo abajo de la eutéctica, digamos a 182 $^{\circ}$ C, porque es la temperatura a la que acaba de efectuarse la reacción eutéctica. El punto de apoyo de la palanca es 61.9% Sn. Los extremos de la línea de enlace coinciden aproximadamente con los extremos de la línea eutéctica.

$$\alpha = (\text{Pb} - 19\% \text{ Sn}) \quad \% \alpha = \frac{97.5 - 61.9}{97.5 - 19.0} \times 100 = 45.35\%$$

$$\beta = (\text{Pb} - 97.5\% \text{ Sn}) \quad \% \beta = \frac{61.9 - 19.0}{97.5 - 19.0} \times 100 = 54.65\%$$

O bien, podríamos decir que la fracción en peso de la fase $\alpha = 0.4535$, y aquella de la fase β es 0.5565.

Una muestra de 200 g de la aleación contendría un total de $200 \text{ g} \times (0.6190) = 123.8 \text{ g}$ de Sn y los 76.2 g restantes de plomo. La masa total de plomo y estaño no pueden cambiar, por la ley de conservación de la masa; lo que cambia es la masa del plomo y el estaño en las distintas fases.

b) A una temperatura justo abajo de la eutéctica:

$$\begin{aligned} \text{La masa de la fase } \alpha \text{ en 200 g de la aleación} \\ &= \text{masa de la aleación} \times \text{fracción de la fase } \alpha \\ &= 200 \text{ g} \times 0.4535 = 90.7 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{La cantidad de la fase } \beta \text{ en 200 g de la aleación} \\ &= (\text{masa de la aleación} - \text{masa de la fase } \alpha) \\ &= 200.0 \text{ g} - 90.7 \text{ g} = 109.3 \text{ g} \end{aligned}$$

También se podría haber expresado esto último como:

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de fase } \beta \text{ en 200 g de la aleación} \\ &= \text{masa de la aleación} \times \text{fracción de la fase } \beta \\ &= 200 \text{ g} \times 0.5465 = 109.3 \text{ g} \end{aligned}$$

Así, a una temperatura justo abajo de la eutéctica, es decir, a 182°C , la aleación contiene 109.3 g de la fase β y 90.7 g de la fase α .

c) Calculemos ahora las masas de plomo y estaño en las fases α y β :

Masa de Pb en la fase α = masa de la fase α en 200 g $\times$ (concentración de Pb en α)

$$\text{Masa de Pb en la fase } \alpha = (90.7 \text{ g}) \times (1 - 0.190) = 73.467 \text{ g}$$

Masa de Sn en la fase α = masa de la fase α - masa de Pb en la fase α

$$\text{Masa de Sn en la fase } \alpha = (90.7 - 73.467 \text{ g}) = 17.233 \text{ g}$$

Masa de Pb en la fase β = masa de la fase β en 200 g $\times$ (fracción de peso de Pb en β)

$$\text{Masa de Pb en la fase } \beta = (109.3 \text{ g}) \times (1 - 0.975) = 2.73 \text{ g}$$

Masa de Sn en la fase β = masa total de Sn - masa de Sn en la fase α

$$= 123.8 \text{ g} - 17.233 \text{ g} = 106.57 \text{ g}$$

Obsérvese cómo pudimos obtener el mismo resultado a partir del balance de masa total de plomo, como sigue:

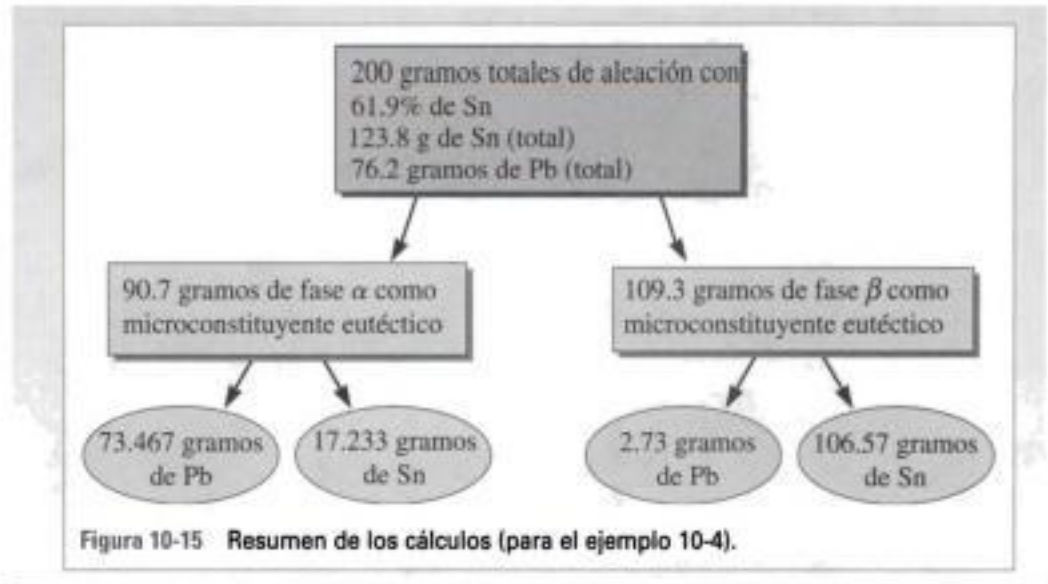
$$\begin{aligned} \text{Masa total de plomo en la aleación} &= \text{masa de plomo en la fase } \alpha \\ &+ \text{masa de plomo en la fase } \beta \end{aligned}$$

$$76.2 \text{ g} = 73.467 \text{ g} + \text{masa de plomo en la fase } \beta$$

$$\text{Masa de plomo en la fase } \beta = 76.2 - 73.467 \text{ g} = 2.73 \text{ g}$$

Es igual que lo que calculamos antes. La figura 10-15 resume las diversas concentraciones y masas.

Este análisis confirma que la mayor parte del plomo en la aleación eutéctica se concentra en la fase α . La mayor parte del estaño se concentra en la fase β .



Aleaciones hipoeutécticas e hipereutécticas Una **aleación hipoeutéctica** es aquella cuya composición estará entre la del lado izquierdo de la línea de enlace que define la reacción eutéctica y la composición eutéctica. Cuando se enfría una aleación hipoeutéctica que contenga entre 19% y 61.9% de Sn, el líquido comienza a solidificarse a la temperatura de

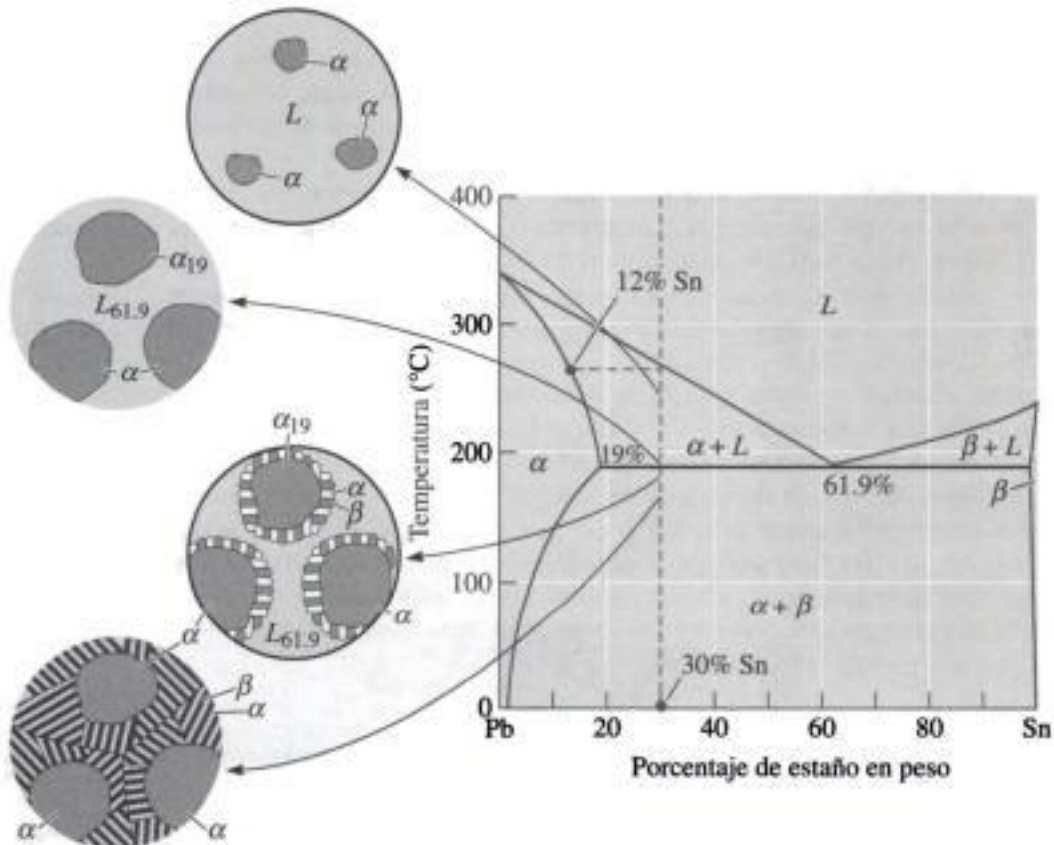


Figura 10-16 Solidificación y microestructura de una aleación hipoeutéctica (Pb-30% Sn).

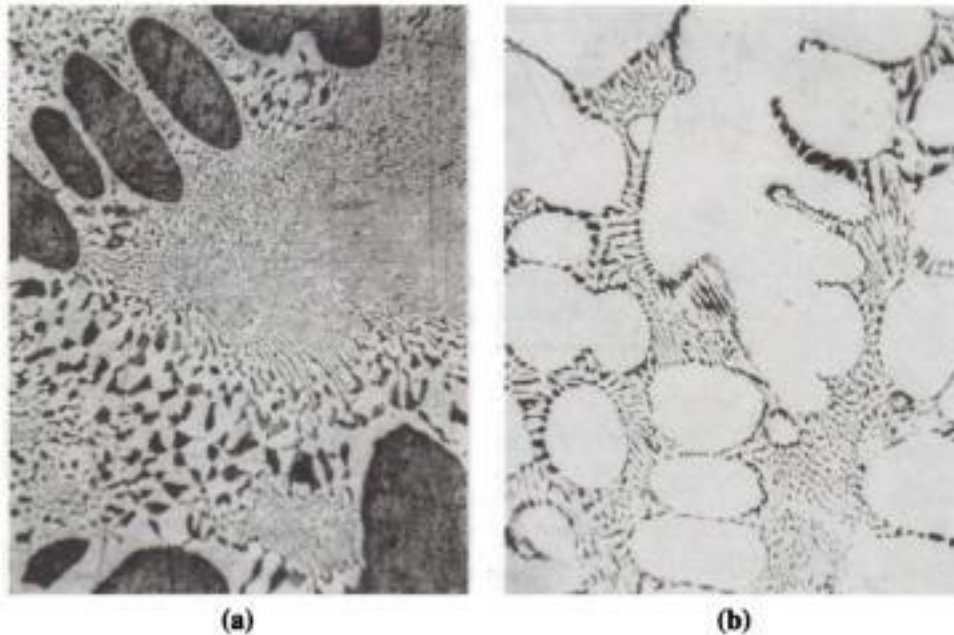


Figura 10-17 (a) Aleación hipoeutéctica de plomo y estaño. (b) Aleación hipereutéctica de plomo y estaño. El componente oscuro es el sólido α , rico en plomo, y el constituyente claro es el sólido β rico en estaño; la estructura laminar fina es el eutéctico (400 $\times$).

liquidus, produciendo sólido α . Sin embargo, la solidificación se termina a través de la reacción eutéctica (Fig. 10-16). Esta secuencia de solidificación sucede para composiciones en las cuales la línea vertical correspondiente a la composición original de la aleación cruza el liquidus y el eutéctico.

La composición de una aleación entre la del extremo derecho de la línea de enlace que define la reacción eutéctica y la composición eutéctica se llama **aleación hipereutéctica**. En el sistema Pb-Sn, toda composición entre 61.9% y 97.5% de Sn es hipereutéctica.

Examinemos una aleación hipoeutéctica que contenga Pb-30% Sn y sigamos los cambios de estructura durante la solidificación (Fig. 10-16). Al llegar a la temperatura de liquidus de 260 °C, nuclea el sólido α que contiene aproximadamente 12% de Sn. Este sólido α crece hasta que la aleación se enfría justo arriba de la temperatura eutéctica. A 184 °C, trazamos una línea de enlace y encontramos que el sólido α contiene 19% de Sn, y que el líquido restante contiene 61.9% de Sn. Observemos que a 184 °C, el líquido contiene ¡la composición eutéctica! Cuando la aleación se enfría a menos de 183 °C, todo el líquido restante pasa por la reacción eutéctica y se transforma en una mezcla lamelar de α y β . Resulta la microestructura de la figura 10-17(a). Obsérvese que el microconstituyente eutéctico rodea al sólido α que se formó entre las temperaturas de liquidus y eutéctica. El microconstituyente eutéctico es continuo y la fase primaria está dispersa entre las colonias de ese microconstituyente.

EJEMPLO 10-5

Determinación de fases y cantidades en una aleación hipoeutéctica Pb-30% Sn

Para una aleación de Pb-30% Sn, determine las fases presentes, sus cantidades y sus composiciones a 300, 200, 184, 182 y 0 °C.

SOLUCIÓN

Temperatura (°C)	Fases	Composiciones	Cantidades
300	L	L: 30% Sn	L = 100%
200	$\alpha + L$	L: 55% Sn α : 18% Sn	$L = \frac{30 - 18}{55 - 18} \times 100 = 32\%$ $\alpha = \frac{55 - 30}{55 - 18} \times 100 = 68\%$
184	$\alpha + L$	L: 61.9% Sn α : 19% Sn	$L = \frac{30 - 19}{61.9 - 19} \times 100 = 26\%$ $\alpha = \frac{61.9 - 30}{61.9 - 19} \times 100 = 74\%$
182	$\alpha + \beta$	α : 19% Sn β : 97.5% Sn	$\alpha = \frac{97.5 - 30}{97.5 - 19} \times 100 = 86\%$ $\beta = \frac{30 - 19}{97.5 - 19} \times 100 = 14\%$
0	$\alpha + \beta$	α : 2% Sn β : 100% Sn	$\alpha = \frac{100 - 30}{100 - 2} \times 100 = 71\%$ $\beta = \frac{30 - 2}{100 - 2} \times 100 = 29\%$

Obsérvese que en estos cálculos se redondearon las fracciones al punto porcentual más próximo. Esto puede causar problemas si tuviéramos que calcular masas de distintas fases, porque podría no conservarse el balance de masa. Se suele aconsejar no redondear los porcentajes cuando se vayan a hacer cálculos sobre cantidades de las distintas fases o masas de elementos en distintas fases.

A la fase sólida α que se forma cuando el líquido se enfría desde la temperatura de liquidus a la de eutéctico se le llama **microconstituyente proeutéctico** o **primario**. Este sólido α no toma parte en la reacción eutéctica. Así, la morfología y la apariencia de esta fase α es muy diferente de aquella fase α que aparece en el microconstituyente eutéctico. Frecuentemente se encuentra que las cantidades y composiciones de los microconstituyentes son más útiles que las cantidades y composiciones de las fases.

EJEMPLO 10-6

Cantidad y composición de microconstituyentes en una aleación hipoeutéctica

Determine las cantidades y las composiciones de cada microconstituyente de una aleación Pb-30% Sn inmediatamente después de que se ha terminado la reacción eutéctica.

SOLUCIÓN

Es una composición hipoeutéctica. Por consiguiente, los microconstituyentes que se esperan son α primario y eutéctico. Nótese que aún tenemos sólo dos fases (α y β). Podemos determinar las cantidades y composiciones de microconstituyentes si examinamos cómo se forman. El microconstituyente α *primario* es todo el sólido α que se forma antes de que la aleación se enfríe hasta la temperatura eutéctica; el microconstituyente

eutéctico es todo el líquido que pasa por la reacción eutéctica. A una temperatura justo arriba de la eutéctica, por ejemplo, a 184 °C, las cantidades y composiciones de las dos fases son:

$$\alpha = 19\% \text{ Sn} \quad \% \alpha = \frac{61.9 - 30}{61.9 - 19} \times 100 = 74\% = \% \alpha \text{ primario}$$

$$L: 61.9\% \text{ Sn} \quad \% L = \frac{30 - 19}{61.9 - 19} \times 100 = 26\% = \% \text{ eutéctico a } 182^\circ \text{C}.$$

Así, el microconstituyente alfa primario se obtiene determinando la cantidad de α presente a la temperatura justo arriba de la eutéctica. La cantidad de microconstituyente eutéctico a una temperatura *justo abajo* de la eutéctica (por ejemplo, 182 °C) se determina calculando la cantidad de líquido *justo arriba* de la temperatura eutéctica (por ejemplo, a 184 °C), ya que todo este líquido de composición eutéctica se transforma en el microconstituyente eutéctico. Nótese que a la temperatura eutéctica (183 °C), la reacción eutéctica avanza (la formación del proeutéctico α es completa); por consiguiente, la cantidad del microconstituyente eutéctico a 183 °C cambia con el tiempo (comenzando en 0% y terminando en 26% de eutéctico, en este caso). Por favor, asegúrese de que entiende usted este ejemplo, ya que muchos estudiantes tienden a desconocer cómo se hacen estos cálculos.

Cuando la aleación se enfría abajo de la temperatura eutéctica, a 182 °C, todo el líquido que había a 184 °C se transforma en el eutéctico, y la composición del microconstituyente eutéctico es 61.9% de Sn. El sólido α presente a 184 °C permanece inalterado al enfriarlo a 182 °C, y es el microconstituyente primario.

La curva de enfriamiento de una aleación hipoeutéctica es una mezcla de las de aleaciones de solución sólida y las aleaciones eutécticas "simples" (Fig. 10-18). Cuando comienza a formarse el α primario, ocurre un cambio en la pendiente a la temperatura de liquidus. El desprendimiento del calor latente de fusión frena la velocidad de enfriamiento a medida que crece el sólido α . Cuando la aleación llega a la temperatura eutéctica, se produce una meseta térmica mientras se efectúa la reacción eutéctica a 183 °C. El orden de solidificación es parecido en una aleación hipereutéctica; produce la estructura que se muestra en la figura 10-17(b).

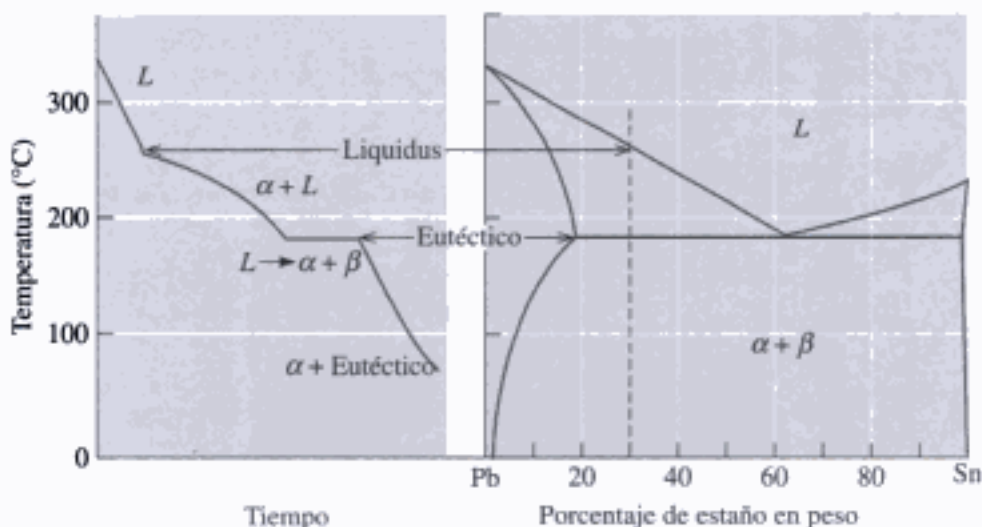


Figura 10-18 Curva de enfriamiento de una aleación Pb-30% Sn hipoeutéctica.

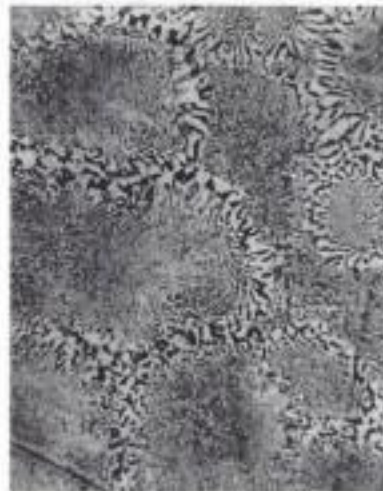
10-5

Resistencia de las aleaciones eutécticas

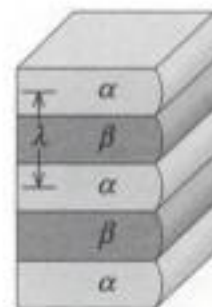
Cada fase en la aleación eutéctica está, hasta cierto grado, endurecida por solución sólida. En el sistema plomo-estaño, la fase α , que es una solución sólida de estaño en plomo, es más resistente que el plomo puro (capítulo 9). Algunas aleaciones eutécticas pueden fortalecerse por trabajo en frío. También se controla el tamaño de grano agregando los inoculantes o refinadores de grano adecuados durante la solidificación. Por último, se puede influir sobre las propiedades controlando la cantidad y la microestructura el sólido eutéctico.

Tamaño de colonias en el eutéctico Las colonias eutécticas, o granos, nuclean y crecen cada una en forma independiente. Dentro de cada colonia, la orientación de las lamelas o laminillas del microconstituyente eutéctico es idéntica. Esa orientación cambia al cruzar un límite de colonia [Fig. 10-19(a)]. Las colonias de eutéctico se pueden refinar por inoculación y mejorar la resistencia de la aleación eutéctica (capítulo 8).

Distancia interlamelar La **distancia interlamelar** en un sólido eutéctico es la que hay desde el centro de una lamela de α hasta el centro de la siguiente lamela de α [Fig. 10-19(b)]. Si la distancia interlamelar es pequeña, eso significa que la superficie entre las fases α - β es grande. Por consiguiente, una distancia interlamelar pequeña aumenta la resistencia del eutéctico.



(a)



(b)

Figura 10-19
(a) Colonias en el eutéctico de plomo-estaño (300 $\times$).
(b) Distancia interlamelar en una microestructura eutéctica.

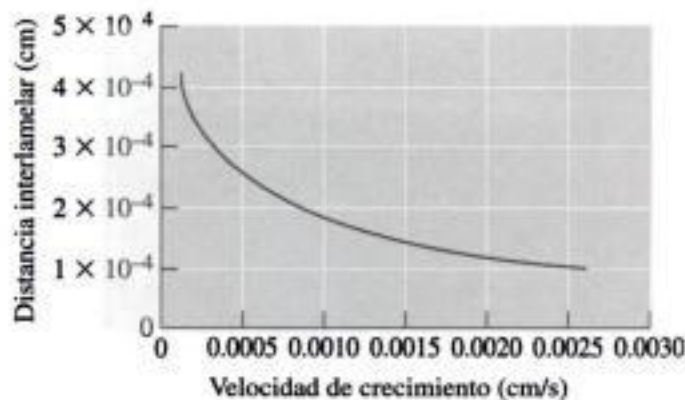


Figura 10-20
Efecto de la velocidad de crecimiento sobre la distancia interlamelar, en el eutéctico de plomo-estaño.

La distancia interlamelar se determina principalmente por la rapidez de crecimiento del sólido eutéctico,

$$\lambda = cR^{-1/2} \quad (10-2)$$

donde R es la velocidad de crecimiento en cm/s y c es una constante. En la figura 10-20 se muestra la distancia interlamelar para el eutéctico de plomo-estaño. Se puede aumentar la rapidez de crecimiento R y, en consecuencia, reducir la distancia interlamelar, aumentando la rapidez de enfriamiento o reduciendo el tiempo de solidificación. En el siguiente ejemplo se demuestra cómo se puede controlar la solidificación de una aleación Pb-Sn.

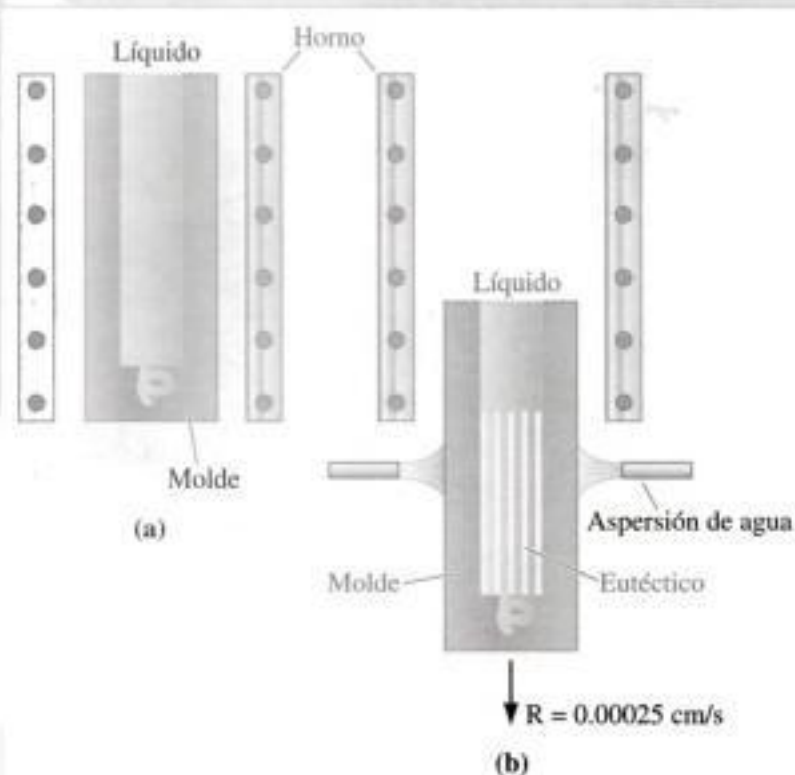
EJEMPLO 10-7 *Diseño de un proceso de solidificación direccional*

Diseñe un proceso para producir un solo "grano" del microconstituyente eutéctico Pb-Sn, cuya distancia interlamelar sea 0.00034 cm.

SOLUCIÓN

Podríamos usar un proceso de solidificación direccional para producir el monocristal controlando la rapidez de crecimiento para asegurar la distancia interlamelar correcta. Para obtener $\lambda = 0.00034$ cm, necesitamos una rapidez de crecimiento de 0.00025 cm/s (Fig. 10-20).

La figura 10-21 muestra cómo podríamos obtener esta rapidez de crecimiento. La aleación Pb-61.9% Sn se fundiría en un molde, en el interior de un horno. El molde se

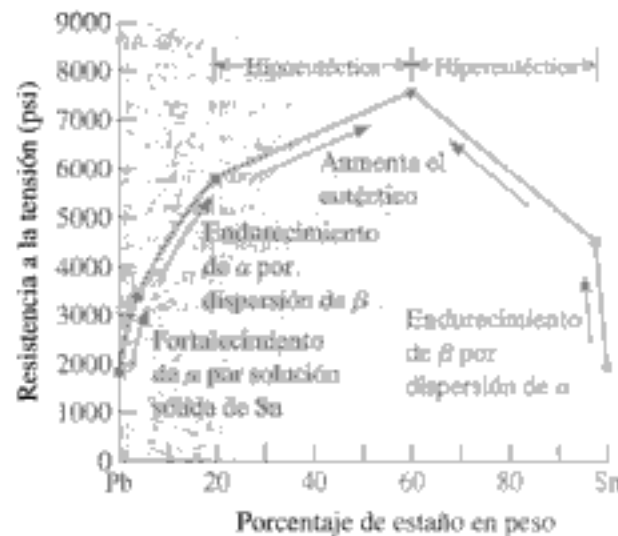


Solidificación direccional de una aleación eutéctica de Pb-Sn: (a) el metal se funde en el horno y (b) el molde se retira lentamente del horno y la pieza se enfría (para el ejemplo 10-7).

sacaría del horno a una velocidad de 0.00025 cm/s, enfriándolo bruscamente con una aspersión de agua al salir del horno. Si sólo crece una colonia eutéctica dentro de la central, todas las lamelas se alinean en paralelo con la dirección de crecimiento. Si la pieza por fabricar es de 10 cm de longitud, su producción tardaría 40 000 s, u 11 horas.

Como se describió en el capítulo 8, este método se ha usado para producir alabes de turbina solidificados direccionalmente, para motores de reacción a alta temperatura, con superaleaciones a base de níquel.

Cantidad de eutéctico Las propiedades también se controlan mediante las cantidades relativas del microconstituyente primario y el eutéctico. En el sistema plomo-estaño, la cantidad del microconstituyente eutéctico varía de 0 a 100% cuando el contenido de estaño aumenta de 0 a 61.9%. Con cantidades crecientes del microconstituyente eutéctico más resistente, aumenta la resistencia de la aleación (Fig. 10-22). De igual modo, cuando se aumenta el plomo agregado al estaño, desde 2.5 hasta 38.1%, disminuye la cantidad de β primario en la aleación hipereutéctica, aumenta la cantidad del eutéctico resistente y la resistencia aumenta. Cuando ambas fases individuales tienen más o menos la misma resistencia, cabe esperar que la aleación eutéctica tenga la máxima resistencia debido al fortalecimiento por la dispersión efectiva.



Efecto de la composición y del mecanismo de fortalecimiento sobre la resistencia a la tensión de las aleaciones de plomo-estaño.

Microestructura del eutéctico No todos los eutécticos tienen una estructura lamelar. Las formas de las dos fases en el microconstituyente están influidas por la velocidad de enfriamiento, la presencia de elementos impuros y la naturaleza de la aleación (Fig. 10-24).

El diagrama de fases eutéctico de aluminio-silicio (Fig. 10-23) forma la base de varias aleaciones comerciales importantes. Sin embargo, la parte de silicio del eutéctico crece como placas delgadas y planas, que parecen aciculares en una micrografía [Fig. 10-24(a)]. Las plaquillas frágiles de silicio concentran esfuerzos y reducen la ductilidad y la tenacidad.

La microestructura eutéctica se altera por modificación en las aleaciones de aluminio-silicio. La **modificación** hace que la fase de silicio crezca en forma de bastones o varillas delgados e interconectados entre las dendritas de aluminio [Fig. 10-24(b)], mejorando la resistencia a la tensión y el % de alargamiento. En dos dimensiones, el silicio modificado parece estar formado por partículas diminutas y redondas. Las aleaciones que se enfrían en forma rápida como las vaciadas a presión, se modifican en forma natural durante la solidificación. Sin embargo, con menores velocidades de enfriamiento, se deben agregar aproximadamente 0.012% de Na o 0.01% de Sr para causar la modificación.

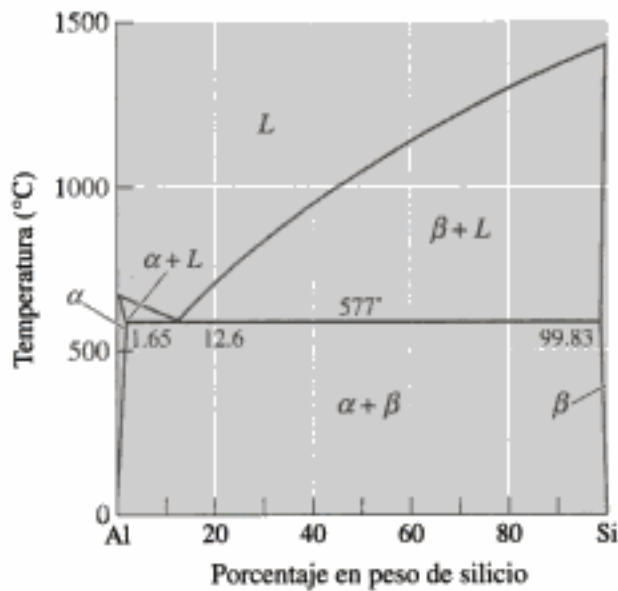


Figura 10-23
Diagrama de fases aluminio-silicio.

También es importante la forma de la fase primaria. Frecuentemente, la fase primaria crece en forma dendrítica y disminuye la distancia entre brazos dendríticos secundarios de la fase primaria, mejorando las propiedades de las aleaciones. Sin embargo, en las aleaciones hipereutécticas de aluminio y silicio, la β gruesa es la fase primaria [Fig. 10-25(a)]. Como la β es dura, las aleaciones hipereutécticas son resistentes al desgaste y se usan para producir partes de motor de automóvil. Pero la β gruesa causa dificultad de maquinado y segregación por gravedad, donde la β primaria flota hacia la superficie de la pieza colada durante su solidificación. Si se agrega 0.05% de fósforo (P) se promueve la nucleación del silicio primario, se refina su tamaño y se reducen al mínimo las características perjudiciales [Fig. 10-25(b)]. Los dos ejemplos siguientes muestran cómo se pueden diseñar las composiciones eutécticas para lograr ciertos niveles de propiedades mecánicas.

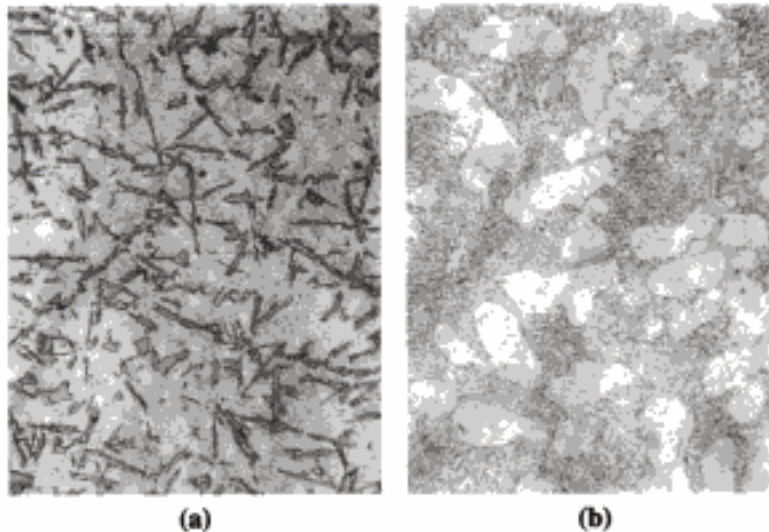


Figura 10-24 Microestructuras eutécticas características: (a) placas aciculares de silicio en el eutéctico aluminio-silicio (100x) y (b) bastones o varillas redondeados de silicio en el eutéctico modificado de aluminio-silicio (100x).

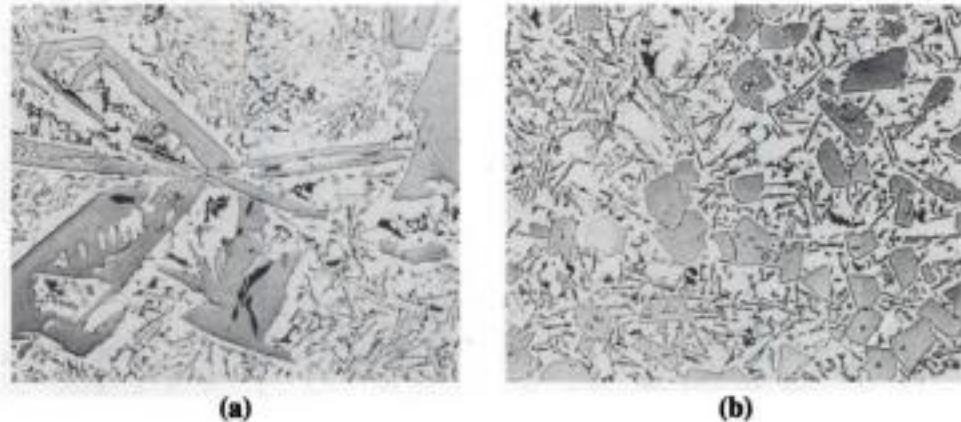


Figura 10-25 Efecto de endurecimiento con fósforo sobre la microestructura de aleaciones hipereutécticas de aluminio-silicio: (a) silicio primario grueso y (b) silicio primario fino, refinado por adición de fósforo (75×). (De ASM Handbook, vol. 7, 1972, ASM International, Materials Park, OH 44073.)

EJEMPLO 10-8

Diseño de materiales para una soldadura de relleno

Una manera de reparar abolladuras en un metal es introducir un material semisólido en la abolladura y dejar que solidifique ese material de relleno. En esta aplicación, el material de relleno debe tener las siguientes especificaciones: 1) una temperatura de fusión menor que 230 °C, 2) una resistencia a la tensión mayor que 6000 psi, 3) tener de 60 a 70% de líquido durante su aplicación y 4) debe ser lo menos costosa posible. Diseñe una aleación y un método de reparación que cumpla con esas especificaciones.

SOLUCIÓN

Veamos si alguna de las aleaciones Pb-Sn puede satisfacer esas condiciones. En primer lugar, la aleación debe contener más de 40% de Sn para tener una temperatura de fusión inferior a 230 °C (Fig. 10-8). Esta baja temperatura facilitará que la persona que hace las reparaciones aplique el relleno.

En segundo lugar, de acuerdo con la figura 10-22, el contenido de estaño debe estar entre 23 y 80%, para tener la resistencia a la tensión de 6000 psi necesaria. Junto con el primer requisito, una aleación que contenga entre 40 y 80% de Sn sería satisfactoria.

En tercer lugar, el costo aproximado del estaño es de \$5500/ton, mientras que el del plomo es de \$550/ton. Entonces, la elección más económica sería una aleación de Pb-40% Sn. También hay otros factores que deben atenderse, como, ¿cuál es la geometría? La aleación, ¿puede fluir bien bajo esa geometría (es decir, es adecuada la viscosidad del metal fundido)?

Por último, el material de relleno debe estar a la temperatura correcta para ser líquido del 60 al 70%. Como indican los siguientes cálculos, la temperatura debe ser entre 200 y 210 °C:

$$\% L_{200} = \frac{40 - 18}{55 - 18} \times 100 = 60\%$$

$$\% L_{210} = \frac{40 - 17}{50 - 17} \times 100 = 70\%$$

Por lo anterior, nuestra recomendación es usar una aleación de Pb con 40% de Sn, aplicada a 205 °C, temperatura a la cual habrá 65% de líquido y 35% de α primaria. Como se dijo antes, también se debe prestar atención a la toxicidad del plomo y a todas las responsabilidades legales que pueda causar el uso de esos materiales. Se han desarrollado varias soldaduras sin plomo.[12,13]

EJEMPLO 10-9 *Diseño de una parte resistente al desgaste*

Diseñe un componente cilíndrico ligero que tenga una excelente resistencia en su pared interna, pero que tenga, en general, ductilidad y tenacidad razonables. Ese producto se debe usar como camisa de cilindro en un motor de automóvil.

SOLUCIÓN

Se producen muchas partes resistentes al desgaste en los aceros los cuales tienen una densidad relativamente alta. Pero las aleaciones hipereutécticas de Al-Si que contienen β primaria pueden tener la resistencia al desgaste necesaria, a una tercera parte de lo que pesaría el acero.

Como la parte que se desea producir tiene forma cilíndrica, un método único para producirla sería por colado centrífugo (Fig. 10-26). En ese proceso, el metal líquido se vierte en un molde rotatorio, y la fuerza centrífuga produce un cuerpo hueco. Además, el material que tiene alta densidad gira y va contra la pared externa del material, y el material que tiene menor densidad que el líquido migra hacia la pared interna.

Cuando se cuela con fuerza centrífuga una aleación hipereutéctica de Al-Si, el sólido β primario nuclea y crece. La densidad de la fase β es (suponiendo que sea igual a la del Si puro), de acuerdo con el apéndice A, 2.33 g/cm³, en comparación con una densidad cercana a 2.7 g/cm³ del aluminio. Al precipitar las partículas de β primaria



del líquido, éstas son desplazadas hacia la superficie interna. El resultado es una pieza colada formada por microconstituyente eutéctico (con ductilidad razonable) en la pared externa y una composición hipereutéctica, que contiene grandes cantidades de β primaria, en la pared interna.

Una aleación común que se usa para producir partes de motores en aluminio es el Al-17% Si. En la figura 10-23 se observa que la cantidad total de β primaria que se puede formar se calcula a 578 °C, justo arriba de su temperatura eutéctica:

$$\% \beta \text{ primaria} = \frac{17 - 12.6}{99.83 - 12.6} \times 100 = 5.0\%$$

Aunque se espera que sólo se forme 5% de β primaria, la acción centrífuga puede duplicar o triplicar la cantidad de β en la pared interna de la pieza colada.

10-6

Eutéticos y procesamiento de materiales

Los procesos de manufactura aprovechan la baja temperatura de fusión asociada a la reacción eutéctica. Las aleaciones de Pb-Sn son la base de una serie de aleaciones con las que se producen materiales de relleno para estañar (capítulo 8). Por ejemplo, si se desea unir tubos de cobre, los tramos individuales se pueden unir introduciendo en la junta la aleación eutéctica Pb-Sn de bajo punto de fusión [Fig. 10-27(a)]. El cobre se calienta justo arriba de la temperatura eutéctica. El cobre caliente funde la aleación de Pb-Sn, la cual es succionada hacia el hueco estrecho por acción capilar. Cuando se enfría y se solidifica la aleación de Pb-Sn, el cobre queda pegado. También deben tenerse en cuenta las posibilidades de corrosión en esos tubos, y el ingreso de plomo (Pb) al agua.

Muchas aleaciones para vaciar se basan también en aleaciones eutécticas. Los líquidos se pueden fundir y vaciar en un molde a bajas temperaturas, reduciendo los costos de la energía que intervienen en la fusión, minimizando los defectos en las piezas vaciadas, tales como sopladuras, y evitando las reacciones entre el metal líquido y el molde. El hierro colado (capítulo 12) y muchas aleaciones de aluminio (capítulo 13) son aleaciones eutécticas.

Aunque la mayor parte de esta explicación se ha centrado en los materiales metálicos, es importante reconocer que los eutéticos también se usan en muchos sistemas cerámicos (capítulo 14). La formación de eutéticos tuvo su papel en la obtención de materiales vítreos llamados alfarería fina de Faenza o egipcia.[14] Las arenas del Valle del Nilo contenían cantidades apreciables de caliza (CaCO_3). Las cenizas vegetales contienen cantidades considerables de óxidos de potasio y de sodio, y se usa para que la arena se funda a menores temperaturas, por la formación de eutéticos.

Los materiales cerámicos de mayor uso son la sílice y la alúmina. La figura 10-27(b) muestra un diagrama de fases para el sistema Al_2O_3 - SiO_2 [9] Obsérvese el eutéctico a ~1587 °C. Las líneas interrumpidas en este diagrama indican extensiones metaestables del líquido y rangos metaestables de miscibilidad.[8,10,15] Como se dijo antes, la formación de esos rangos hace posible fabricar productos de utilidad tecnológica, como los vidrios Vycor™ y Pyrex™. El vidrio Vycor™ se obtiene fundiendo primero (aproximadamente a 1500 °C) 63% de sílice, 27% de óxido de boro, 7% de óxido de sodio y 3% de alúmina. A continuación, el vidrio se moldea en las formas que se deseen. Durante la formación del vidrio, la fase vítrea está separada (por el rango metaestable de miscibilidad) en regiones ricas en óxido de boro y en sílice. Las regiones ricas en óxido de boro se disuelven con un ácido. El objeto poroso restante se sinteriza y se forma el vidrio Vycor™ que contiene 95% de sílice, 4% de óxido de boro y 1% de óxido de sodio.[10] Sería muy difícil obtener un vidrio de alta sílice como éste sin recurrir a

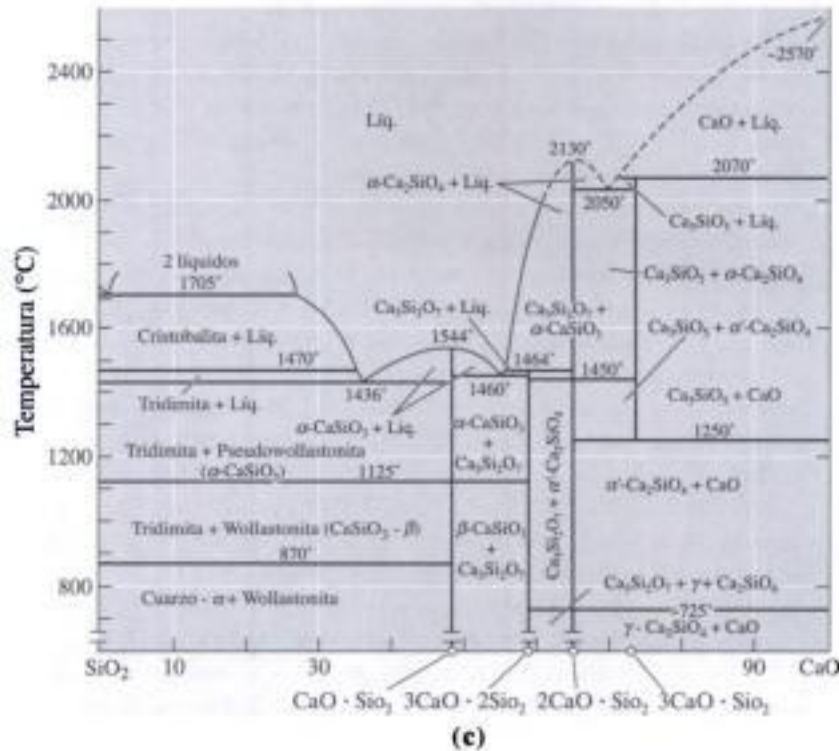
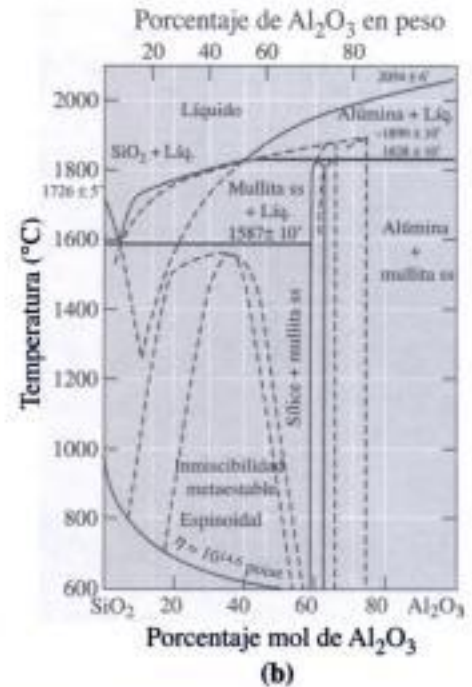
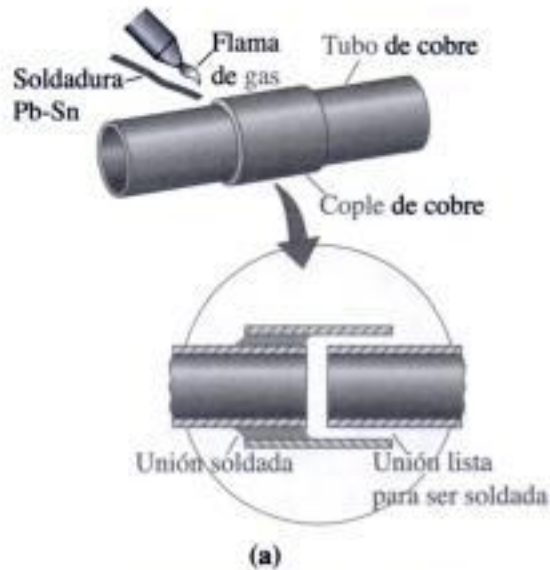


Figura 10-27 (a) Con frecuencia se usa una aleación eutéctica Pb-Sn en la soldadura para unir componentes. Una fuente de calor, como la flama de un gas, calienta los componentes y el metal de aporte; éste es atraído dentro de la unión y se solidifica. (b) Diagrama de fases para el sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. [9] (Adaptado de *Introduction to Phase Equilibria in Ceramics*, por Bergeron, C.G. y Risbud, S.H., The American Ceramic Society, Inc., 1984, p. 44.) (c) Diagrama de fases para el sistema CaO-SiO_2 . (Fuente: Adaptado de *Introduction to Phase Equilibria*, por C.G. Bergeron y S.H. Risbud, pp. 44 y 45, figs. 3-36 y 3-37. Copyright © 1984 American Ceramic Society.)

la técnica descrita arriba. El vidrio Pyrex® contiene aproximadamente 80% de sílice, 13% de óxido de boro, 4% de óxido de sodio, 2% de alúmina. Estos vidrios se usan mucho en la fabricación de utensilios de laboratorio (matraces y otros) y productos domésticos.

La figura 10-27(c) muestra un diagrama binario de fases para el sistema CaO-SiO_2 . [9] Las formulaciones llamadas vidrio E o vidrio S se usan para fabricar las fibras de los plásticos reforzados con fibra de vidrio. Esos vidrios se preparan fundiendo arena de sílice, caliza y ácido bórico a unos 1260 °C.[7] A continuación, el vidrio se trefila en fibras. El vidrio E (la letra "E" significa "eléctrico", que era el que se usó originalmente en aisladores eléctricos) contiene aproximadamente 52-56% de sílice, 12-16% de Al_2O_3 , 5-10% de B_2O_3 , 0-5% de MgO , 0-2% de Na_2O , 0-2% de K_2O . El vidrio S (la letra "S" por "strength", resistencia en inglés) contiene un 65% de sílice, 12-25% de Al_2O_3 , 10% de MgO , 0-2% de Na_2O y 0-2% de K_2O .[16] todos los porcentajes mencionados en este párrafo son en peso.

La determinación de los diagramas de fases cerámicas mediante técnicas experimentales implica el tratamiento térmico y el procesamiento de componentes (es decir, triturar, moler y mezclar polvos de alta pureza, para obtener uniformidad) a diversas temperaturas para asegurar el equilibrio. Los materiales en equilibrio a distintas temperaturas se enfrían con rapidez a la temperatura ambiente. Suponiendo que la estructura y el conjunto de fases que existían a la temperatura de tratamiento o procesamiento térmico son iguales en el material enfriado con rapidez, se puede hacer un análisis por difracción de rayos X y por microscopía electrónica (capítulo 3). Frecuentemente, es muy difícil alcanzar el equilibrio en los sistemas cerámicos, porque la cinética de las reacciones tiende a ser lenta. El resultado es que no es raro encontrar distintas variaciones y correcciones que se hacen a diagramas de fases para sistemas cerámicos (y hasta metálicos). Para los sistemas metálicos, se puede usar la determinación de curvas de enfriamiento para generar los diagramas de fases. En el capítulo 9, describimos el concepto de las curvas de enfriamiento. Como dijimos en ese capítulo, hay muchas bases de datos, como las de la ASM International, National Institute of Standards and Technology (NIST) y la Sociedad Cerámica Americana, así como interfaces computarizadas (como ThermoCalc™) que facilitan la localización y uso de diagramas de fases.[17]

La formación de los eutécticos ayuda en la fabricación de los vidrios inorgánicos. Muchos vidrios comunes se basan en la SiO_2 , que se funde a 1710 °C. Si se agrega Na_2O al SiO_2 , se introduce una reacción eutéctica con temperatura eutéctica aproximada de 790 °C. El vidrio de $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ se puede producir a baja temperatura. Es la causa por la cual se agregan muchos óxidos para obtener vidrios de silicato. Algunos óxidos, como el de sodio, ayudan a fundir el gas a menores temperaturas, es decir, actúan como fundentes. Un vidrio hecho con óxido de sodio y sílice es soluble en el agua y se llama "vidrio soluble". Se puede agregar cal o carbonato de calcio (CaCO_3) al fundido. El carbonato de calcio se descompone y forma CaO . El CaO también actúa como fundente y produce composiciones que no se disuelven en agua. Un vidrio de sosa y cal (o vidrio A) se obtiene con óxido de sodio, óxido de calcio (agregado como cal o CaCO_3) y sílice en forma de arena.[16]

Se puede usar la reacción eutéctica para acelerar la adhesión por difusión o para aumentar la velocidad de sinterizado de polvos compactados en sistemas metálicos y cerámicos. En ambos casos, se produce un líquido que une a materiales o partículas de polvo de composición distinta, aun cuando la temperatura de proceso sea menor que la temperatura de fusión de los componentes que intervienen en el proceso (sinterizado en fase líquida).

Sin embargo, a veces no se desea que se forme el eutéctico; como es el último en solidificar, rodea a las fases primarias. En consecuencia, los eutécticos que son frágiles, fragilizan toda la aleación, aunque en la estructura esté presente un pequeño porcentaje del microconstituyente eutéctico. La deformación de esa aleación podría causar falla debida al eutéctico frágil.

Otro ejemplo es el del Al_2O_3 , que lo hace atractivo como refractario para contener acero líquido. La temperatura de fusión del CaO (2070 °C) es aún mayor. Si se pone en contacto un

ladrillo de Al_2O_3 con uno de CaO , se produce una serie de eutécticos, formándose un líquido cuya temperatura de fusión es menor que las que se usan en el proceso de fabricación del acero. En consecuencia, el refractario que contiene el acero líquido puede fallar. Se aplican consideraciones parecidas a los ladrillos de sílice que se usan en la fabricación del acero. Si existe una pequeña cantidad de alúmina, se puede formar un líquido eutéctico con bastante facilidad, que disminuye en forma considerable la capacidad de carga de los ladrillos.

10-7

Solidificación del sistema eutéctico en desequilibrio

Suponga que tenemos una aleación, como la de Pb-15% Sn, que ordinariamente solidifica como aleación de solución sólida. El último líquido se debe solidificar cerca de 230°C , bastante arriba de la eutéctica. Sin embargo, si la aleación se enfría con demasiada rapidez, se produce una curva solidus fuera de equilibrio (Fig. 10-28). El primario α continúa creciendo hasta que, justo arriba de 183°C , el líquido restante en desequilibrio contiene 61.9% de Sn. Entonces, este líquido se transforma en el microconstituyente eutéctico, rodeando al sólido α primario. Para las condiciones de la figura 10-28, la cantidad de eutéctico en desequilibrio es:

$$\% \text{ eutéctico} = \frac{15 - 10}{61.9 - 10} \times 100 = 9.6\%$$

Cuando se trata térmicamente una aleación como la de Pb-15% Sn, se debe mantener la temperatura máxima abajo de la temperatura eutéctica de 183°C , para evitar la fragilidad en

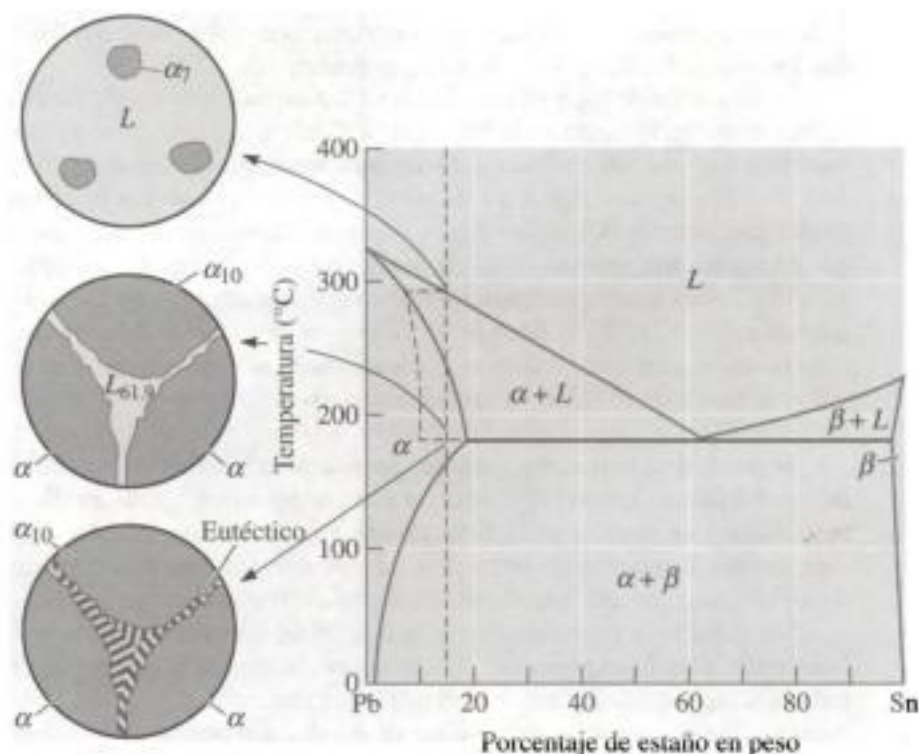


Figura 10-28 Solidificación en desequilibrio y microestructura de una aleación de Pb-15% Sn. Si la solidificación es muy rápida, se puede formar un microconstituyente eutéctico en desequilibrio.

caliente o la fusión parcial (capítulo 9). Este concepto es muy importante en el endurecimiento por precipitación o envejecimiento de aleaciones metálicas, como las del sistema Al-Cu.

10-8

Diagramas de fases ternarios

Muchos sistemas de aleaciones se basan en tres o incluso más elementos. Cuando hay tres elementos tenemos una aleación **ternaria**. Para un sistema ternario bajo presión constante puede coexistir un máximo de cuatro fases, que definirá un punto invariante. Para describir los cambios de estructura con la temperatura, debemos trazar un diagrama de fases tridimensional. La figura 10-29 muestra un **diagrama de fases ternario** formado por los elementos A , B y C . Obsérvese que hay dos eutécticos binarios en las dos caras visibles del diagrama; un tercer eutéctico binario entre los elementos B y C está oculto en la parte trasera del diagrama.

Es difícil usar el diagrama ternario tridimensional; sin embargo, la información que contiene se puede presentar en dos dimensiones con alguno de varios métodos, que incluyen la gráfica de liquidus y la gráfica isotérmica.

Gráfica de liquidus En la figura 10-29 encontramos que la temperatura a la que comienza la solidificación está sombreada. Se podrían transferir esas temperaturas para cada composición, a un diagrama triangular, como el de la figura 10-30, y graficar las temperaturas de liquidus como curvas de nivel isotérmicas. Esta presentación ayuda en la predicción de la temperatura de solidificación del material. La gráfica de liquidus también muestra la identidad de la fase primaria que se forma durante la solidificación, para cualquier composición dada.

Gráfica isotérmica La gráfica isotérmica muestra las fases presentes en el material a determinada temperatura. Se usa para predecir las fases, sus cantidades y sus composiciones a esa temperatura. La figura 10-31 muestra una gráfica isotérmica obtenida de la figura 10-29 a temperatura ambiente.

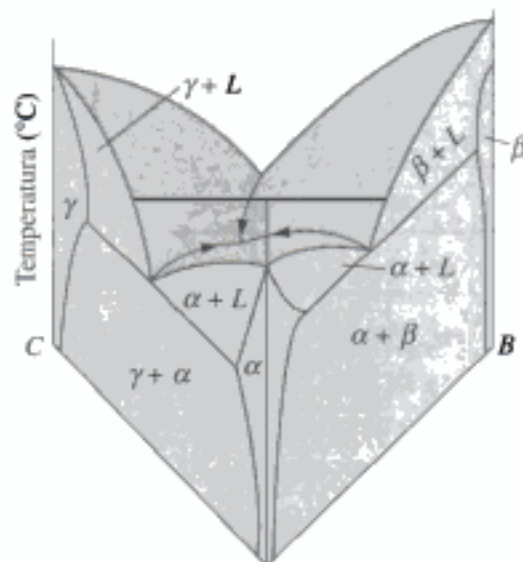


Figura 10-29
Diagrama de fases ternario hipotético. En las tres fases hay diagramas binarios de fases.

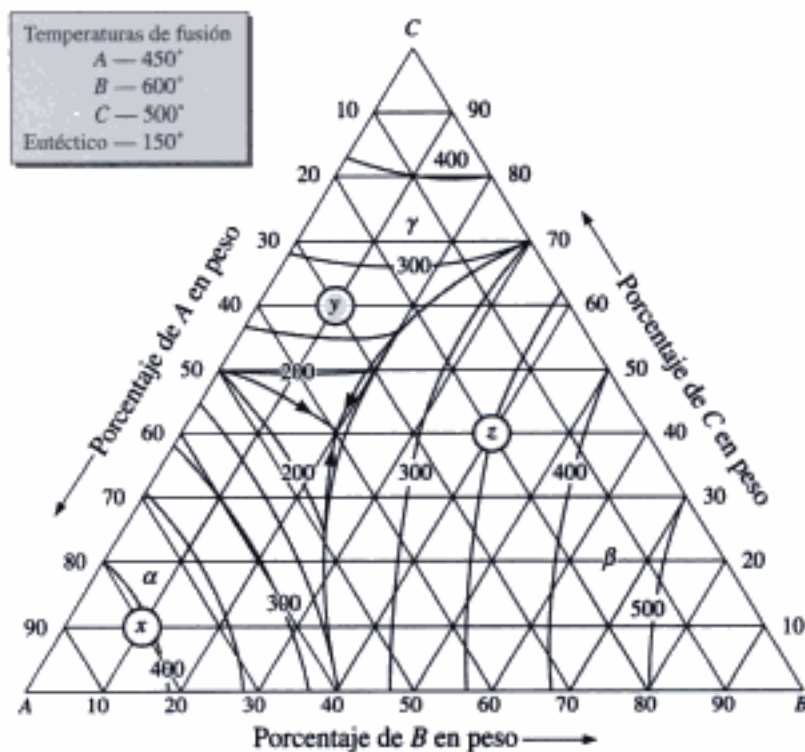


Figura 10-30 Gráfica de liquidus para el diagrama ternario de fases hipotético. Los círculos marcados con x, y y z indican las diversas composiciones del ejemplo 10-10.

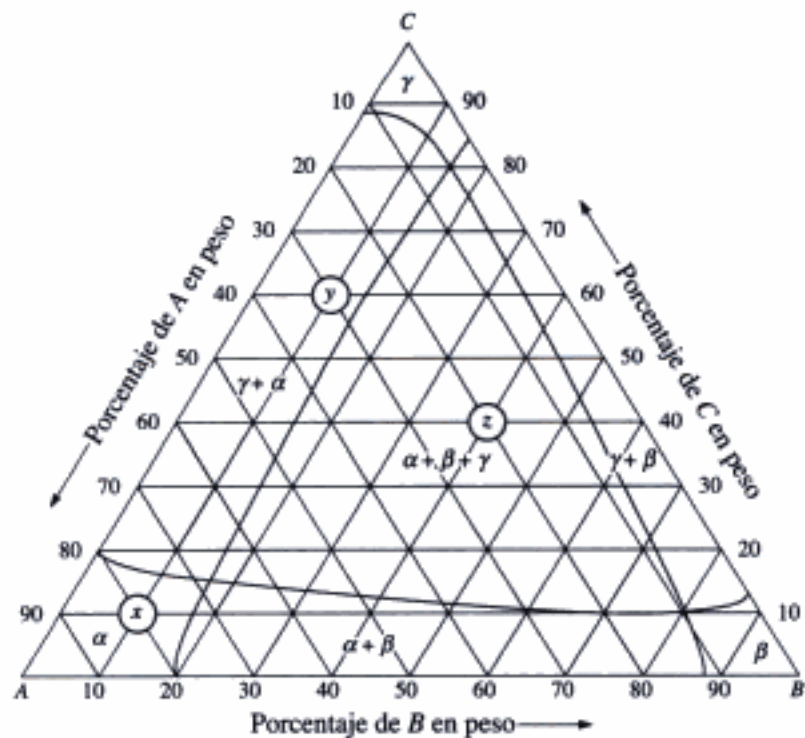


Figura 10-31 Gráfica isotérmica a temperatura ambiente, para el diagrama ternario de fases hipotético. Los círculos marcados con x, y y z indican las diversas composiciones del ejemplo 10-10.

EJEMPLO 10-10 *Determinación de liquidus en un diagrama de fases ternario*

Use las gráficas ternarias de las figuras 10-30 y 10-31 para determinar la temperatura de liquidus, la fase primaria que se forma durante la solidificación y las fases a temperatura ambiente de los siguientes materiales:

Punto x: 10% de B, 10% de C, el resto de A

Punto y: 10% de B, 60% de C, el resto de A

Punto z: 40% de B, 40% de C, el resto de A

SOLUCIÓN

La composición 10% B, 10% C y el resto A está representada por el punto x en las figuras; según la isoterma en esta región, la temperatura de liquidus es de 400 °C. La fase primaria, como lo indica el diagrama, es α . La estructura final (Fig. 10-31) es totalmente α .

La composición 10% B, 60% C y el resto A está en el punto y; interpolando las isotermas en esta región, la temperatura de liquidus es de aproximadamente 270 °C. La fase primaria que se forma en esta sección del diagrama es γ , y las fases a temperatura ambiente son α y γ .

La composición 40% B, 40% C y el resto A está en el punto z; la temperatura de liquidus en esta región es de 350 °C, y el punto está en la región de β primaria. Las fases a temperatura ambiente son α , β y γ .

RESUMEN

- Al producir un material que contenga dos o más fases se obtiene el endurecimiento por dispersión. En los materiales metálicos, el límite entre las fases impide el movimiento de dislocaciones y mejora la resistencia. La introducción de varias fases puede aportar otras ventajas, incluyendo el mejoramiento de la tenacidad de las cerámicas y los polímeros a la fractura.
- Para obtener un endurecimiento óptimo por dispersión, en especial en los materiales metálicos, se debería formar una gran cantidad de partículas pequeñas, duras y discontinuas de la fase dispersa, en una matriz suave y dúctil, para proporcionar los obstáculos más efectivos contra las dislocaciones. Las partículas redondas de fase dispersa minimizan las concentraciones de esfuerzos, y las propiedades finales de la aleación se pueden controlar con las cantidades relativas de éstas y de la matriz.
- Los compuestos intermetálicos, que suelen ser resistentes pero frágiles, se introducen con frecuencia como fases dispersas.
- Se han desarrollado estructuras de matriz basadas en compuestos intermetálicos para aprovechar sus propiedades en altas temperaturas.
- Los diagramas de fases para los materiales de varias fases contienen, normalmente, reacciones de una o más fases:
 - La reacción eutéctica permite que el líquido solidifique en forma de una mezcla íntima de dos fases. Si se controla el proceso de solidificación, se puede obtener una amplia gama de propiedades. Algunos de los factores que se pueden controlar son: el tamaño

de grano o las distancias entre brazos dendríticos secundarios de microconstituyentes primarios, el tamaño de la colonia del microconstituyente eutéctico, la distancia interlamelar dentro del microconstituyente eutéctico, la microestructura, o forma, de las fases en el interior del microconstituyente eutéctico y la cantidad del microconstituyente eutéctico que se forma.

- La reacción eutectoide causa la transformación de un sólido en una mezcla de otros dos sólidos. Como se verá en el próximo capítulo, los tratamientos térmicos para controlar la reacción eutectoide forman una base excelente para el endurecimiento por dispersión.
- En las reacciones peritética y peritectoide, dos fases se transforman en una sola fase al enfriar. No hay endurecimiento por dispersión, y con frecuencia se presentan graves problemas de segregación.
- La reacción monotética produce una mezcla de un sólido y un líquido. Aunque esta reacción no produce endurecimiento por dispersión, sí aporta otras ventajas a algunas aleaciones, como una buena facilidad de maquinado.

GLOSARIO

Aleación hipoeutéctica Composición de una aleación entre la del extremo izquierdo de la línea de enlace que define la reacción eutéctica y la composición eutéctica.

Aleación ternaria Aleación formada al combinar tres elementos o compuestos.

Aleaciones hipereutécticas Composiciones de aleación entre la del extremo derecho de la línea de enlace que define la reacción eutéctica y la composición eutéctica.

Compuesto intermetálico Compuesto formado por dos o más metales, que tiene su composición, estructura y propiedades propias y únicas.

Compuesto intermetálico estequiométrico Fase formada por la combinación de dos componentes que resulta en un compuesto que tiene estructura y propiedades distintas de las de cualquiera de los componentes. El compuesto intermetálico estequiométrico tiene una relación fija de los componentes.

Compuesto intermetálico no estequiométrico Fase formada por la combinación de dos componentes para formar un compuesto que tiene una estructura y unas propiedades distintas de las de cualquiera de los componentes. El compuesto no estequiométrico tiene una relación variable de componentes (véase también Solución sólida intermedia).

Curva solvus Curva de solubilidad que separa una región de una fase de un solo sólido, de una fase de dos sólidos, en el diagrama de fases.

Diagrama de fases ternario Diagrama de fases con tres componentes que muestra las fases presentes y sus composiciones a varias temperaturas. El diagrama requiere una gráfica tridimensional o se presenta en forma de cortes isotérmicos bidimensionales de un diagrama tridimensional.

Distancia interlamelar Distancia entre el centro de una lamela, o placa, de una fase y el centro de la lamela o placa vecina de la misma fase.

Endurecimiento por dispersión Aumento de la resistencia de un material al formar más de una fase. Con un buen control del tamaño, forma, cantidad y propiedades individuales de las fases, se pueden obtener excelentes combinaciones de propiedades.

Endurecimiento por envejecimiento Mecanismo de endurecimiento basado en una secuencia de transformaciones en estado sólido que genera una dispersión de partículas ultrafinas de una segunda fa-

se. Es lo mismo que el endurecimiento por precipitación. El endurecimiento por envejecimiento es una forma de endurecimiento por dispersión (capítulo 11).

Endurecimiento por precipitación Mecanismo de endurecimiento que se basa en una secuencia de transformaciones en fase sólida, para generar una dispersión de precipitados ultrafinos de una segunda fase (capítulo 11). Es lo mismo que endurecimiento por envejecimiento. Es una forma de endurecimiento por dispersión.

Estructura cristalina ordenada Soluciones sólidas en las que átomos diferentes ocupan sitios específicos y no aleatorios en la estructura cristalina.

Estudio de isopletas Determinación de reacciones y cambios microestructurales que se esperan en determinada composición química en un sistema.

Gráfica de liquidus Gráfica en dos dimensiones que muestra la temperatura a la cual comienza a solidificar un sistema de aleación con tres componentes cuando se enfría.

Gráfica isotérmica Sección horizontal a través de un diagrama ternario de fases, que muestra las fases presentes a determinada temperatura.

Hiper Prefijo que indica que la composición de una aleación es mayor que la composición con la que se efectúa una reacción de tres fases.

Hipo Prefijo que indica que la composición de una aleación es menor que la composición con la que se efectúa una reacción de tres fases.

Interfaz entre fases El límite o frontera entre dos fases en un microconstituyente. En materiales metálicos este límite es un obstáculo para el movimiento de dislocaciones y provee endurecimiento por dispersión y por precipitación.

Isopleta Línea en un diagrama de fases que indica composición química constante.

Lamela Placa o fase delgada que se forma durante ciertas reacciones de tres fases, como la eutéctica o la eutectoide.

Matriz Fase sólida continua en una microestructura compleja. Se pueden formar partículas de fase sólida dispersa dentro de la matriz.

Microconstituyente Fase o mezcla de fases en una aleación que tiene una apariencia distintiva. Frecuentemente, una microestructura se describe en términos de los microconstituyentes y no de las fases reales.

Microconstituyente eutéctico Mezcla característica de dos fases que se forman como resultado de la reacción eutéctica.

Microconstituyente proeutéctico o primario Microconstituyente que se forma antes de iniciar una reacción de tres fases.

Modificación Adición de elementos aleantes, como sodio o estroncio, que cambian la microestructura del microconstituyente eutéctico en aleaciones de aluminio-silicio.

Monotéctica Reacción de tres fases en la que un líquido se transforma en un sólido y en un segundo líquido durante el enfriamiento.

Peritéctica Reacción de tres fases en la que se combinan un sólido y un líquido para producir un segundo sólido, durante el enfriamiento.

Peritectoide Reacción de tres fases en la que se combinan dos sólidos para formar un tercer sólido al enfriarse.

Precipitado o fase dispersa Fase sólida que se forma en la fase original de la matriz cuando se rebasa el límite de solubilidad. Frecuentemente usamos el término precipitado, en lugar de partículas de

✓ PROBLEMAS

- 10-1 ¿Cuál es el principio de endurecimiento por dispersión?
- 10-2 ¿Qué es una interfaz entre fases?
- 10-3 ¿Se puede aplicar el endurecimiento por dispersión a los materiales cerámicos? Explique por qué.

Sección 10-1 Principios y ejemplos del endurecimiento por dispersión

- 10-4 ¿Qué es un precipitado?
- 10-5 ¿Qué es un microconstituyente? ¿Un microconstituyente ¿es una fase? Explique.
- 10-6 ¿Cuáles son los requisitos de una matriz y un precipitado para que sea eficaz el endurecimiento por dispersión?
- 10-7 ¿Qué es un microconstituyente?
- 10-8 ¿Qué es un plástico reforzado con fibra de vidrio? ¿Es un material endurecido por dispersión? Explique por qué.
- 10-9 ¿Por qué los precipitados aciculares no son buenos para el endurecimiento por dispersión?
- 10-10 Los materiales endurecidos por dispersión ¿se pueden usar a altas temperaturas? Los materiales endurecidos por trabajo en frío ¿se pueden usar a altas temperaturas? Explique por qué.
- 10-11 ¿Por qué se prefieren las partículas pequeñas para el endurecimiento por dispersión?
- 10-12 ¿Por qué las partículas de precipitado deben ser duras?

Sección 10-2 Compuestos intermetálicos

- 10-13 ¿Qué es un compuesto intermetálico? ¿En qué difiere de otros compuestos? Por ejemplo, además de la diferencia obvia en la composición, ¿en qué difiere el TiAl de, por ejemplo, Al_2O_3 ?
- 10-14 Explique con claridad las dos distintas formas en las que se pueden usar los compuestos intermetálicos.
- 10-15 ¿Cuáles son algunas de las aplicaciones del MoSi_2 ? ¿Qué significa el término peste, aplicado a este material?
- 10-16 ¿Cuáles son algunos de los problemas principales en la utilización de compuestos intermetálicos en aplicaciones con alta temperatura?
- 10-17 Con base en el material que se presenta aquí, ¿cree usted que la ductilidad de los intermetálicos se considera intrínsecamente limitada?
- 10-18 ¿Qué factores deben tenerse en cuenta en un posible uso de materiales para un transbordador que vaya al espacio exterior y regrese a la Tierra en forma repetitiva?

- 10-19 Describa dos aplicaciones no estructurales cualesquiera de los intermetálicos.

Sección 10-3 Diagramas de fases que contienen reacciones entre tres fases

- 10-20 Defina los términos reacción eutéctica, peritética, peritectoide y monotética.
- 10-21 ¿Qué es una reacción invariante? Demuestre que para un sistema de dos componentes, la cantidad de grados de libertad para una reacción invariante es cero.
- 10-22 En la figura 10-32 se muestra un diagrama de fases hipotético.
- ¿Están presentes compuestos intermetálicos? En caso afirmativo, identifíquelos y determine si son estequiométricos o no estequiométricos.
 - Identifique las soluciones sólidas presentes en el sistema. ¿Es alotrópico el material A o el material B?
 - Identifique las reacciones de tres fases anotando la temperatura, la ecuación de la reacción, la com-

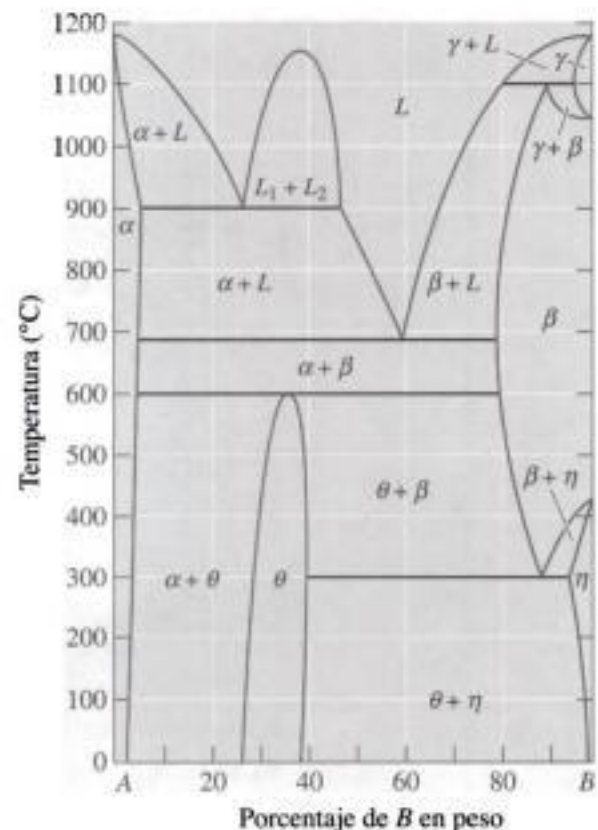
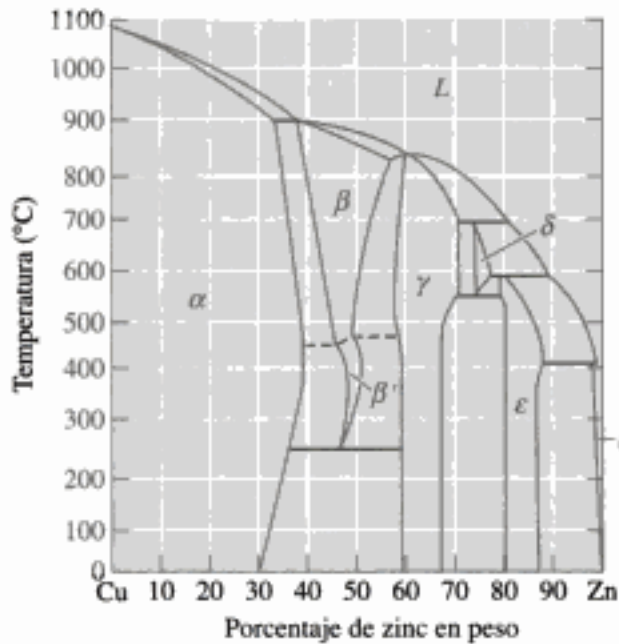


Figura 10-32 Diagrama de fases hipotético (para el problema 10-22).

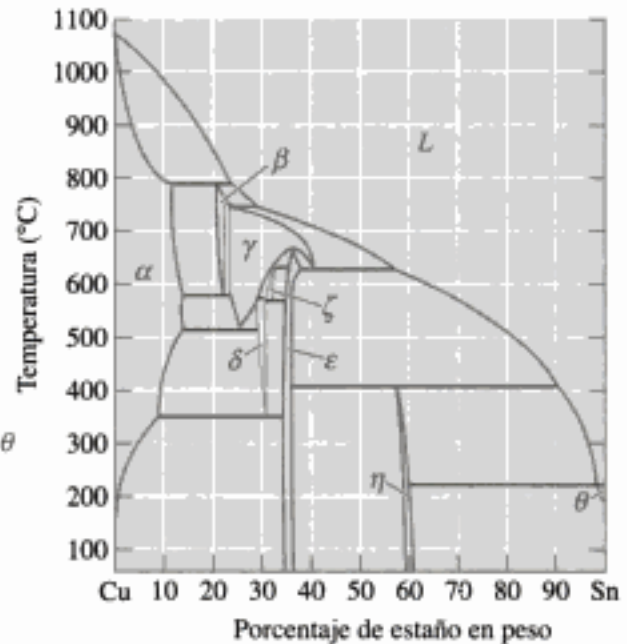
posición de cada fase en la reacción y el nombre de la reacción.

10-23 En la figura 10.33 se muestra el diagrama de fases Cu-Zn.

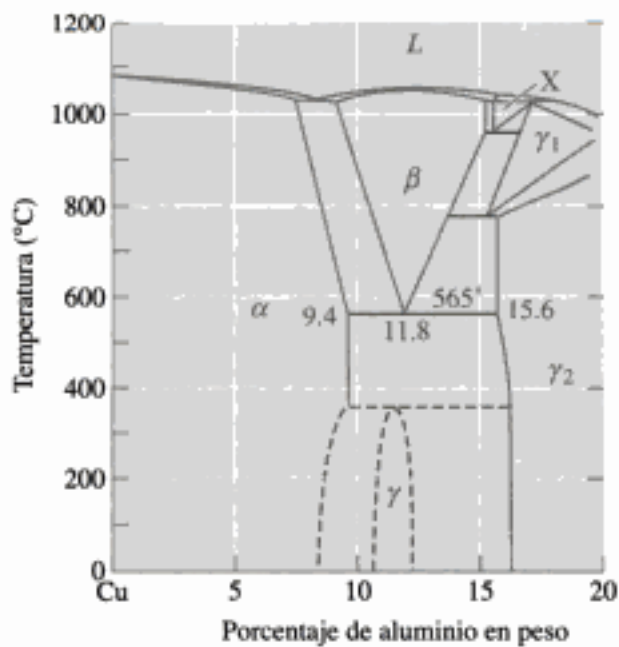
a) ¿Están presentes compuestos intermetálicos? En caso afirmativo, identifíquelos y determine si son estequiométricos o no estequiométricos.



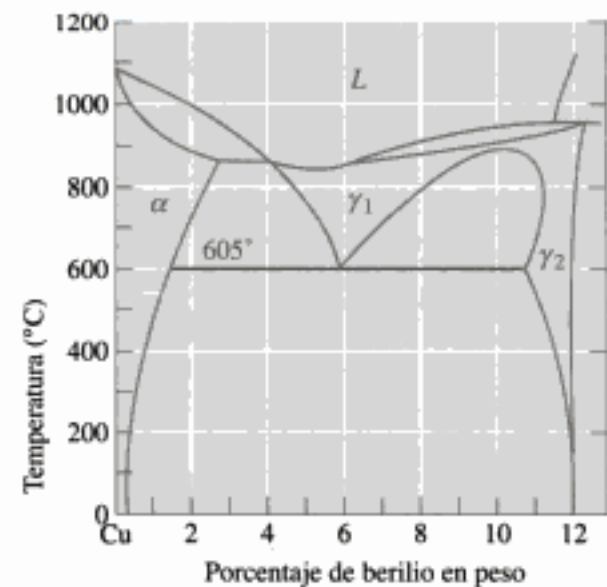
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 10-33 Diagramas binarios de fase para los sistemas (a) cobre-zinc, (b) cobre-estaño, (c) cobre-aluminio y (d) cobre-berilio (para los problemas 10-23).

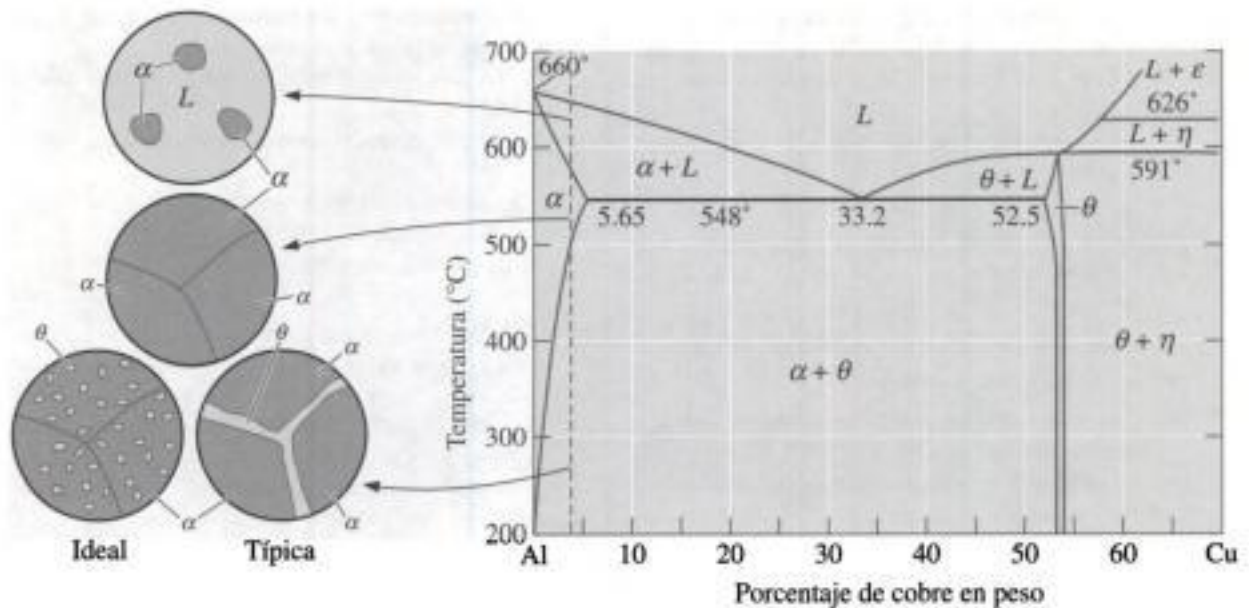


Figura 10-34 Diagrama de fases aluminio-cobre y las microestructuras que se pueden formar durante el enfriamiento de una aleación de Al-4% Cu (para el problema 10-24).

- b) Identifique las soluciones sólidas presentes en el sistema.
- c) Identifique las reacciones de tres fases, anotando la temperatura, la ecuación de la reacción y el nombre de la reacción.
- 10-24 En la figura 10-34 se muestra una parte del diagrama de fases Al-Cu.
- a) Determine la fórmula del componente θ .
- b) Identifique la reacción de tres fases anotando la temperatura, la ecuación de la reacción, la composición de cada fase en la reacción y el nombre de la reacción.
- 10-25 En la figura 10-35 se muestra el diagrama de fases Al-Li.
- a) ¿Están presentes compuestos intermetálicos? En caso afirmativo, identifíquelos y determine si son estequiométricos o no estequiométricos. Determine la fórmula de cada compuesto.
- b) Identifique las reacciones de tres fases anotando la temperatura, la ecuación de la reacción, la composición de cada fase en la reacción y el nombre de la reacción.
- 10-26 Se localiza un compuesto intermetálico con 10% en peso de Si en el diagrama de fases Cu-Si. Determine la fórmula del compuesto.
- 10-27 Aplique la regla de las fases para predecir y explicar cuántas fases sólidas se forman en una reacción eutéctica de un diagrama de fases ternario (de tres componentes), suponiendo que la presión es fija.

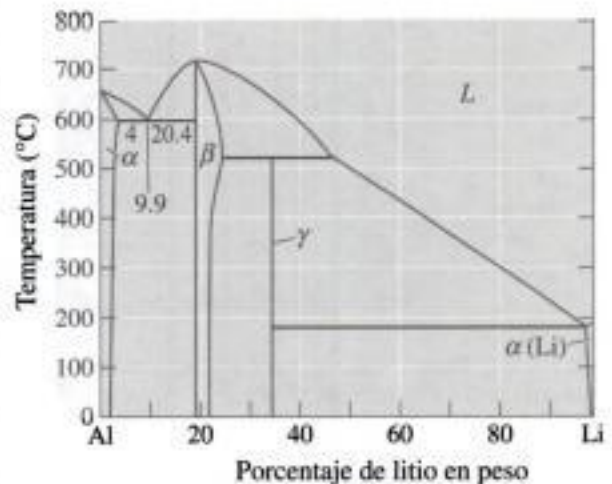


Figura 10-35 Diagrama de fases aluminio-litio (para el problema 10-25).

Sección 10-4 El diagrama de fases eutécticas

- 10-28 ¿Qué origen tiene la palabra eutéctico?
- 10-29 ¿Qué es una isopleta? ¿Qué es un estudio de isopleta(s)?
- 10-30 En una aleación Pb-15% Sn que se solidifica, determine:

- a) la composición del primer sólido en formarse,
- b) la temperatura de liquidus, la de solidus, la de solvus y el intervalo de solidificación de la aleación,
- c) las cantidades y composiciones de cada fase a 260 °C,
- d) las cantidades y composiciones de cada fase a 183 °C y
- e) las cantidades y composiciones de cada fase a 25 °C.

10-31 Para una aleación de Al-12% Mg (Fig. 10-36) durante su solidificación, determine:

- a) La composición del primer sólido que se forma,
- b) la temperatura de liquidus, la de solidus, la de solvus y el intervalo de solidificación de la aleación,
- c) las cantidades y composiciones de cada fase a 525 °C,
- d) las cantidades y composiciones de cada fase a 450 °C y
- e) las cantidades y composiciones de cada fase a 25 °C.

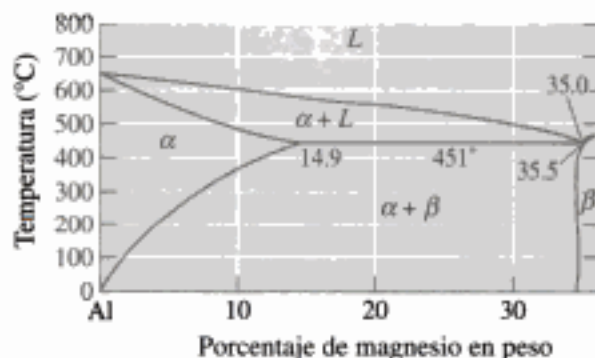


Figura 10-36 Parte del diagrama de fases aluminio-magnesio (para el problema 10-31).

10-32 Para una aleación Pb-35% Sn, determine

- a) si la aleación es hipoeutéctica o hipereutéctica,
- b) la composición y el primer sólido que se forma durante la solidificación,
- c) las cantidades y composiciones de cada fase a 184 °C,
- d) las cantidades y composiciones de cada fase a 182 °C,
- e) las cantidades y composiciones de cada microconstituyente a 182 °C y
- f) las cantidades y composiciones de cada fase a 25 °C.

10-33 Para una aleación de Pb-70% Sn, determine

- a) si la aleación es hipoeutéctica o hipereutéctica,

- b) la composición del primer sólido que se forma durante la solidificación,
- c) las cantidades y composiciones de cada fase a 184 °C,
- d) las cantidades y composiciones de cada fase a 182 °C,
- e) las cantidades y composiciones de cada microconstituyente a 182 °C y
- f) las cantidades y composiciones de cada fase a 25 °C.

10-34 Calcule el porcentaje β total y el porcentaje de microconstituyente eutéctico a temperatura ambiente para las siguientes aleaciones de plomo-estaño: 10% Sn, 20% Sn, 50% Sn, 60% Sn, 80% Sn y 95% Sn. Use la figura 10-22 para graficar la resistencia de las aleaciones en función del porcentaje β y del porcentaje eutéctico. Explique sus gráficas.

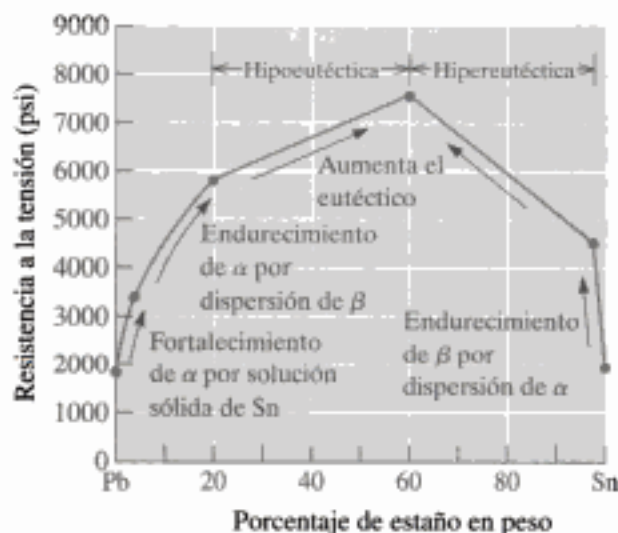


Figura 10-22 (Repetida para el problema 10-34). Efecto de la composición y del mecanismo de endurecimiento sobre la resistencia a la tensión de aleaciones de plomo-estaño.

10-35 Para una aleación de Al-4% Si (véase la Fig. 10-23, p. 474), determine

- a) si la aleación es hipoeutéctica o hipereutéctica,
- b) la composición del primer sólido que se forma durante la solidificación,
- c) las cantidades y composiciones de cada fase a 578 °C,
- d) las cantidades y composiciones de cada fase a 576 °C, las cantidades y composiciones de cada microconstituyente a 576 °C y
- e) las cantidades y composiciones de cada fase a 25 °C.

Sección 10-8 Diagramas de fases ternarios

10-65 Aplique la regla de las fases de Gibbs a un sistema ternario para demostrar que la cantidad máxima de fases que pueden coexistir es cuatro.

10-66 Véase el diagrama ternario de fases de las figuras 10-30 y 10-31. Determine la temperatura de liquidus, la composición del primer sólido que se forma y las fases presentes a temperatura ambiente, para las composiciones siguientes:

- a) 30% B-20% C, el resto A,
- b) 10% B-25% C, el resto A y
- c) 60% B-10% C, el resto A.

10-67 Véase el diagrama ternario de fases de las figuras 10-30 y 10-31. Determine la temperatura de liquidus, la composición del primer sólido que se forma y las fases presentes a temperatura ambiente para las siguientes composiciones:

- a) 5% B-80% C, el resto A,
- b) 50% B-5% C, el resto A,
- c) 30% B-35% C, el resto A.

10-68 Véase la gráfica de liquidus de la figura 10-30.

- a) Para B constante en 20%, trace una gráfica de la variación de la temperatura de liquidus desde 80%

20% B-0% de C y el resto de A, hasta 0% 20% B-80% de C y el resto de A.

b) ¿Cuál es la composición del eutéctico ternario en este sistema?

c) Estime la temperatura a la que se efectúa la reacción eutéctica.

10-69 Con la gráfica de liquidus de la figura 10-30, prepare otra gráfica de temperatura de liquidus en función de porcentaje de B, para una relación constante de los materiales A y C (esto es, desde B puro hasta 50% A-50% C en la gráfica de liquidus). El material B se funde a 600°C.



Problemas de diseño

10-70 Diseñe un proceso que permita trabajar en caliente a una aleación de Pb-15% Sn solidificada bajo condiciones de disequilibrio.

10-71 Diseñe un proceso de unión de difusión eutéctica para unir aluminio con silicio. Describa los cambios de microestructura en la interfaz durante el proceso de unión.

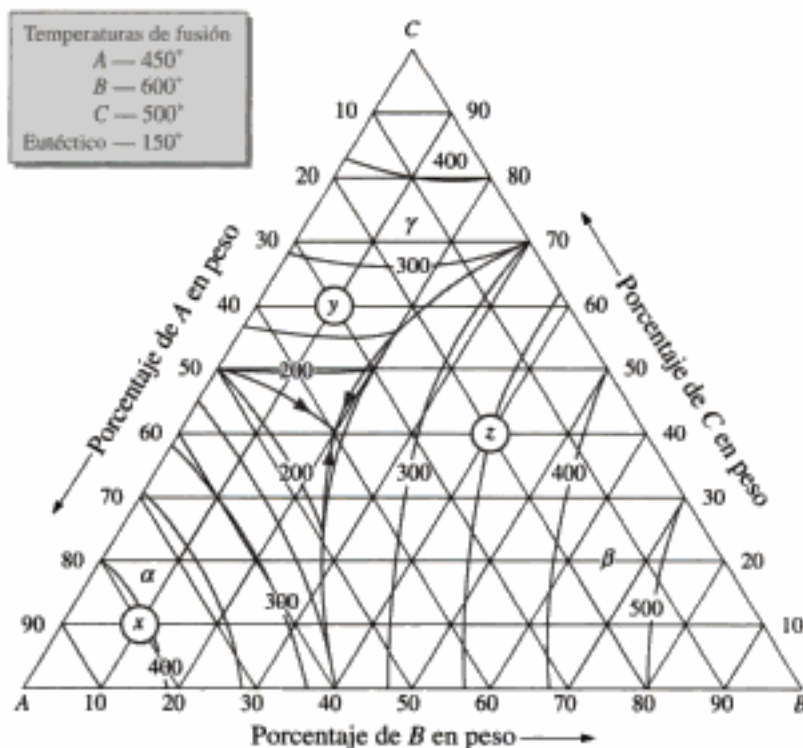


Figura 10-30 (Repetida para los problemas 10-67, 10-68 y 10-69). Gráfica de liquidus para el diagrama hipotético de fases ternarias.

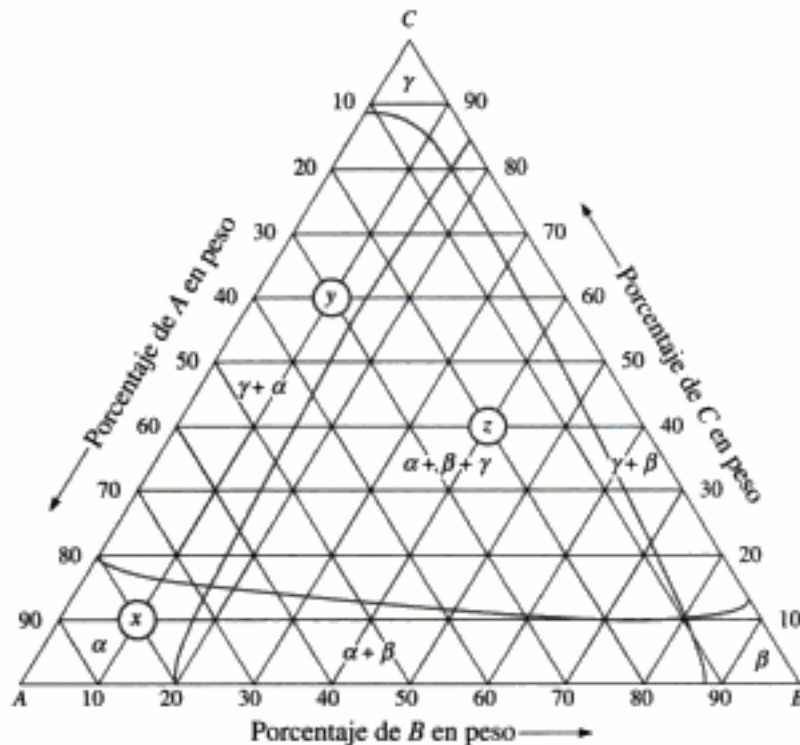


Figura 10-31 (Repetida para los problemas 10-66 y 10-67). Gráfica isotérmica a temperatura ambiente para el diagrama hipotético de fases ternarias.

- 10-72 Diseñe un proceso de solidificación direccional que proporcione un espacio interlamelar de 0.00005 cm en una aleación Pb-Sn eutéctica. Quizá necesite determinar la constante c en la ecuación 10-2.
- 10-73 Diseñe una aleación de Al-Si para latonado y el proceso para unir con éxito una aleación de Al-Mn que tiene una temperatura de liquidus de 659 °C y una temperatura de solidus de 656 °C. El latonado, como el estañado, abarca la introducción de un metal de aporte en una unión sin fundir los metales que están siendo unidos.
- 10-74 Su compañía desearía producir partes ligeras de aluminio que tengan tanto una excelente dureza como resistencia al desgaste. Las partes deben tener una buena combinación de resistencia, ductilidad e integridad interna. Diseñe los pasos del proceso desde el inicio de la fusión hasta el momento en que el metal líquido llena la cavidad del molde.



Problema en computadora

- 10-75 Escriba un programa que le ayude a resolver problemas tales como los ilustrados en los ejemplos 10-3 o 10-4. Los datos de entrada, serán por ejemplo, la composición global de la aleación, la masa de la aleación, los pesos o masas atómicas de los elementos (o compuestos), que forman el sistema binario. El programa debe inducir al lector a que introduzca la temperatura y la composición de las fases. El programa debe proporcionar al usuario las fracciones de las fases presentes y la masa total de las fases, así como la masa de cada elemento en las diferentes fases. Comience con un programa que proporcione una solución para el ejemplo 10-3 y extiéndalo para resolver el ejemplo 10-4.

Endurecimiento por dispersión mediante transformaciones de fase y tratamiento térmico

¿Alguna vez se preguntó...

- ...quién inventó e hizo volar el primer aeroplano?
- ...de qué manera los ingenieros refuerzan las aleaciones de aluminio usadas en las aeronaves?
- ...pueden las aleaciones recordar su forma?
- ...por qué ciertos aceros se endurecen al enfriarlos bruscamente a partir de temperaturas elevadas?
- ...con qué aleaciones se fabrican los frenos de ortodoncia?
- ...resultaría posible mejorar aún más la fuerza y, por tanto, la resistencia contra las abolladuras o golpes de los aceros laminados, una vez fabricada la carrocería de un automóvil?
- ...qué son los materiales inteligentes?

En el capítulo 10 estudiamos con detalle la forma en que las partículas de segunda fase pueden incrementar la resistencia de los materiales metálicos. También vimos la forma en que se preparan los materiales endurecidos por dispersión y cuáles son las trayectorias posibles para la formación de segundas fases durante la solidificación de las aleaciones, especialmente en el caso de las

aleaciones eutécticas. En este capítulo continuaremos analizando el endurecimiento por dispersión, mientras describimos toda una diversidad de procesos de transformación de estado sólido, incluyendo endurecimiento por precipitación o envejecimiento y la reacción eutectoide. También analizaremos la forma en que las transformaciones de fase fuera de equilibrio proporcionan

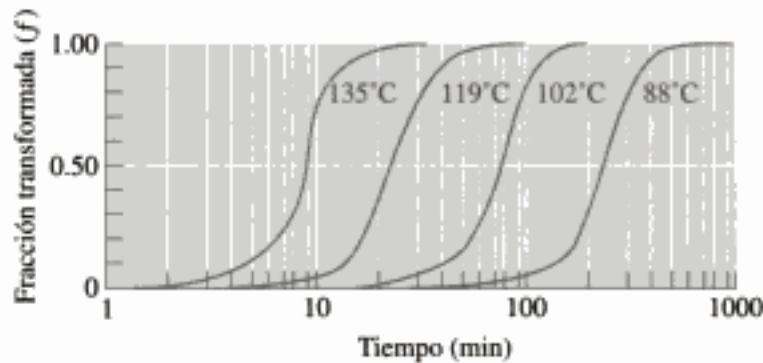


Figura 11-2 Efecto de la temperatura sobre la recrystalización del cobre al trabajar en frío.

La figura 11-2 muestra curvas sigmoideas a distintas temperaturas para la recrystalización del cobre; conforme se incrementa la temperatura, *aumenta* la velocidad de recrystalización del cobre, ya que en el caso del cobre el crecimiento es el factor más importante.

A cualquier temperatura en particular, la velocidad general de transformación es el producto de las velocidades de nucleación y de crecimiento. En la figura 11-3(a) se muestra el efecto combinado de las velocidades de nucleación y de crecimiento. Se puede observar que existe una velocidad máxima a un subenfriamiento crítico. El tiempo requerido para la transformación está inversamente relacionado con la velocidad de transformación; la figura 11-3(b) muestra el tiempo requerido para la transformación en escala logarítmica. Esta curva en forma de *C* es común para muchas transformaciones en metales, cerámicos, vidrios y polímeros. Nótese que el tiempo requerido a una temperatura que corresponde a la transformación de fase en equilibrio sería ∞ (es decir, la transformación de fase no ocurrirá). Esto se debe a que no se presenta subenfriamiento y, por tanto, la velocidad de nucleación homogénea es igual a cero.

En algunos procesos, como la recrystalización del material trabajado en frío, encontramos que la velocidad de transformación se reduce de manera continua al bajar la temperatura. En este caso, la nucleación ocurre con facilidad y predomina la difusión o el crecimiento (es decir, el crecimiento es el paso límite de velocidad para la transformación). El ejemplo siguiente ilustra la forma en que puede obtenerse la energía de activación para una transformación de fase en estado sólido como, por ejemplo, la recrystalización a partir de datos relacionados con la cinética del proceso.

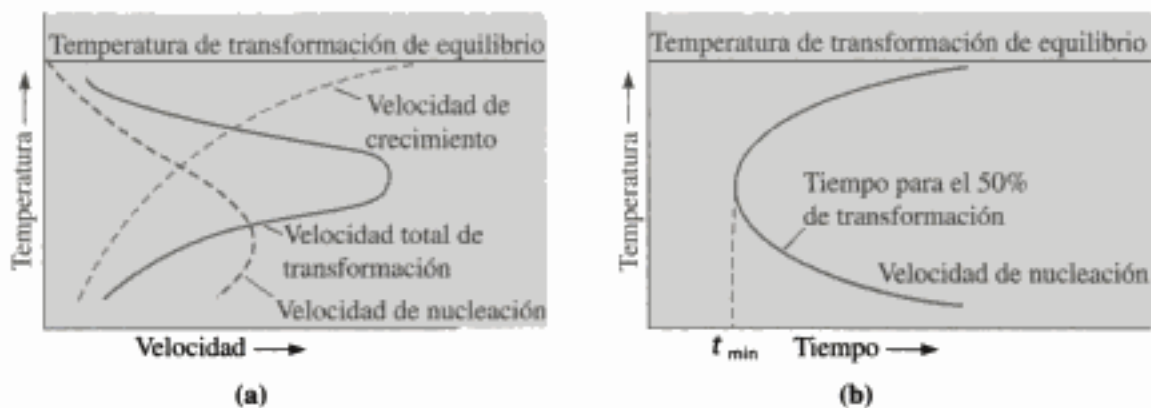


Figura 11-3 (a) El efecto de la temperatura sobre la velocidad de una transformación es el producto de la contribución de la velocidad de crecimiento y de la nucleación, lo que da una velocidad de transformación máxima a una temperatura crítica. (b) En consecuencia, existe un tiempo mínimo ($t_{\min}$) requerido para la transformación, según se observa en la "curva en C".

$$\begin{aligned}
 Q/R &= 10,414 \\
 Q &= 20\,693 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} \\
 \therefore 0.111 &= A \exp \left(\frac{-20\,693 \text{ cal/mol}}{\left(1.987 \frac{\text{cal}}{\text{deg} \cdot \text{mol}} \right) \times (408 \text{ deg})} \right) \\
 A &= 0.111 / 8.21 \times 10^{-12} = 1.351 \times 10^{10} \text{ s}^{-1} \\
 \therefore \text{Velocidad} &= 1.351 \times 10^{10} \exp \left(\frac{-20\,693}{RT} \right)
 \end{aligned}$$

En este ejemplo en particular, la velocidad a la cual ocurre la reacción se *incrementa* conforme aumenta la temperatura, lo que indica que la reacción podría estar dominada por la difusión.

11-2 Aleaciones endurecidas al exceder el límite de solubilidad

En el capítulo 10, vimos que las aleaciones de plomo y estaño (Pb-Sn) con aproximadamente 2 a 19% de Sn pueden endurecerse por dispersión, debido a que se excede la solubilidad del estaño en el plomo.

Una situación similar se presenta en las aleaciones aluminio cobre. Por ejemplo, por encima de los 500 °C, la aleación Al-4% Cu (que se muestra en la figura 11-5) es 100% α . La fase α es, hasta 5.65% en peso, una solución sólida de aluminio que contiene cobre. Al enfriarse por debajo de la temperatura del solvus, se precipita una segunda fase θ . La fase θ , que es un compuesto intermetálico duro y frágil CuAl_2 , aporta el endurecimiento por dispersión. Aplicando la regla de la palanca al diagrama de fase que se muestra en la figura 11-5, podemos

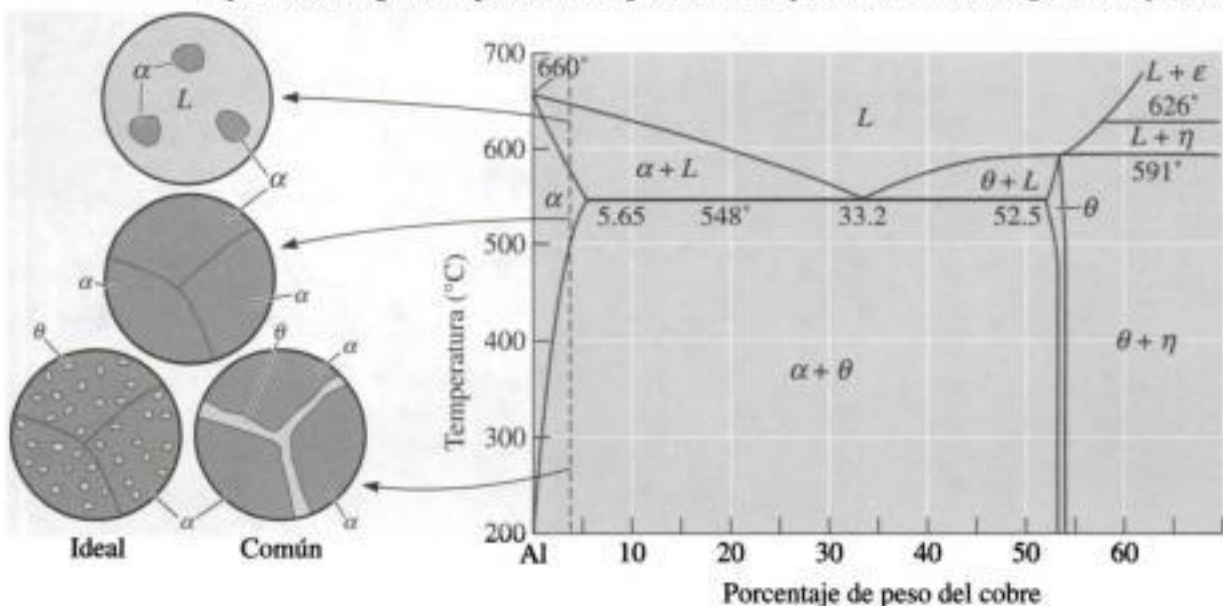


Figura 11-5 El diagrama de fase aluminio cobre y las microestructuras que pudieran desarrollarse durante un enfriamiento de una aleación Al 4% Cu.

mostrar que a 200°C y más abajo, en una aleación del 4% Cu, solo aproximadamente el 7.5% de la estructura final es θ . Para satisfacer los requisitos de un buen endurecimiento por dispersión, es menester controlar la precipitación de la segunda fase.

Estructura Widmanstätten La segunda fase puede crecer de forma que ciertos planos y direcciones en el precipitado sean paralelos a los planos y direcciones de la matriz, creando un patrón en forma de canasta conocido como **estructura Widmanstätten**. [2] Este mecanismo de crecimiento minimiza las energías de formación y las superficiales, permitiendo mayores velocidades de crecimiento. El crecimiento Widmanstätten produce una apariencia característica en el precipitado. Cuando aparece una forma de aguja [Fig 11-6 (a)], el precipitado Widmanstätten puede promover la nucleación de grietas, reduciendo, por tanto, la ductilidad del material. Sin embargo, algunas de estas estructuras dificultan, una vez formadas las grietas, su propagación, con lo que se obtiene una buena tenacidad a la fractura. Algunas aleaciones de titanio y algunos materiales cerámicos obtienen de esta manera su tenacidad.

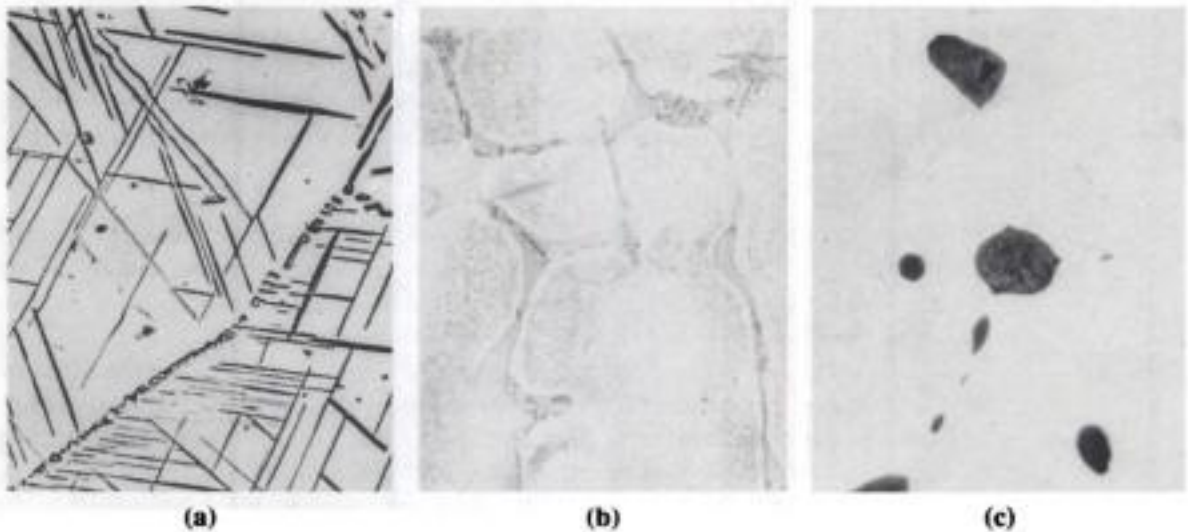


Figura 11-6 (a) Agujas Widmanstätten en una aleación Cu Ti (420 $\times$). (Del ASM Handbook, vol. 9, *Metallography and Microstructure* (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073). (b) Precipitado continuo θ en una aleación Al 4% Cu, causado por un enfriamiento lento (500 $\times$). (c) Precipitados de plomo en los bordes de grano en el cobre (500 $\times$).

Relaciones de energía interfacial Es de esperarse, a fin de minimizar energía superficial, que el precipitado tenga una forma esférica. Sin embargo, cuando se forma el precipitado en una interfaz, la forma del mismo también resulta influida por la **energía interfacial** (γ_{pm}) en los bordes entre los granos de la matriz y el precipitado. La relación entre γ_{pm} y la energía interfacial de los bordes de grano de la fase matriz ($\gamma_{m,gb}$) está dada por la ecuación siguiente. Esto supone que la fase de precipitado se forma en esas localidades.

Suponiendo que la segunda fase está nucleando, las energías superficiales interfaciales del borde matriz precipitado (γ_{mp}) y la energía del límite de grano de la matriz ($\gamma_{m,gb}$) definen un **ángulo diedro** θ en la interfaz entre matriz y precipitado que, a su vez, determina la forma de dicho precipitado (Fig. 11-7). La relación es:

$$\gamma_{m,gb} = 2\gamma_{mp} \cos \frac{\theta}{2} \quad (11-5)$$

Nótese que no se puede utilizar esta ecuación cuando el ángulo diedro es igual a 0° o 180°.

11-3

Endurecimiento por envejecimiento o por precipitación

El **endurecimiento por envejecimiento** o **por precipitación** se produce por una secuencia de transformaciones de fase que conduce a una dispersión uniforme de precipitados coherentes de tamaño fino en una matriz más blanda y dúctil. La aparición no esperada de este fenómeno ayudó a los hermanos Wright, quienes, el 17 de diciembre de 1903, efectuaron el primer vuelo controlado que cambió el mundo para siempre. Recientemente, Gayle y sus colaboradores demostraron que la aleación de aluminio utilizada por los hermanos Wright para la fabricación del motor del primer aeroplano que voló se contaminó con cobre del molde.[3] El endurecimiento por envejecimiento se presentó de manera inadvertida al permanecer caliente el molde durante el proceso de fundido. El descubrimiento formal del endurecimiento por precipitación o envejecimiento ocurrió en 1906.[1] También ocurrió accidentalmente. El descubrimiento ha sido atribuido a A. Wilm, quien intentaba el endurecimiento de una solución sólida de una aleación Al-Cu-Mn. La aplicación del endurecimiento por envejecimiento se inició en el vuelo histórico de los hermanos Wright, e incluso ahora las aleaciones de aluminio utilizadas para las aeronaves se endurecen utilizando esta técnica. El endurecimiento por precipitación o envejecimiento tal vez sea uno de los primeros ejemplos de materiales nanoestructurados cuyo uso ha encontrado un extensa aplicación.[4] En la fotografía que aparece al principio de este capítulo, se muestra una micrografía de la aleación endurecida por envejecimiento utilizada en el motor del aeroplano de los hermanos Wright. El número 1 muestra la matriz y el 2 y 3 muestran los precipitados que se formaron.

11-4

Aplicaciones de las aleaciones endurecidas por envejecimiento

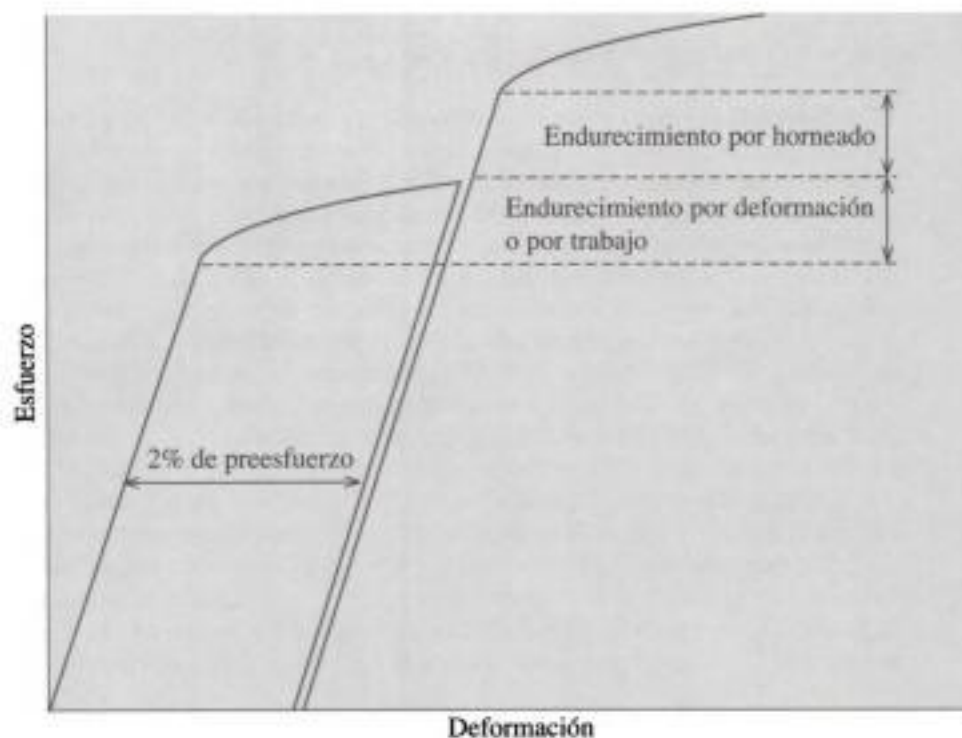
Antes de examinar el detalle de los mecanismos de las transformaciones de fase necesarios para que ocurra el endurecimiento por envejecimiento, veamos algunas de las aplicaciones de esta técnica. Una importante ventaja del endurecimiento por precipitación o envejecimiento es que se puede utilizar para elevar el límite de cedencia de muchos materiales metálicos mediante tratamientos térmicos relativamente simples y sin causar cambios importantes en la densidad; por tanto, la relación de resistencia a densidad de una aleación puede mejorarse considerablemente utilizando endurecimiento por precipitación o envejecimiento. Por ejemplo, el límite de esfuerzo de fluencia de una aleación de aluminio puede incrementarse de aproximadamente 20 000 a 60 000 psi como resultado de este método de endurecimiento.

Las superaleaciones basadas en níquel (aleaciones que se basan en Ni, Cr, Al, Ti, Mo y C) son endurecidas por precipitación de una fase γ' parecida a Ni_3Al que es rica en Al y en Ti.[1,2] De manera similar, las aleaciones de titanio (por ejemplo, Ti-6Al-4V), los aceros inoxidables, Be-Cu y muchos aceros pueden ser endurecidos por precipitación y usados en una diversidad de aplicaciones.

Se han diseñado nuevas formulaciones para aceros laminados, de manera que el endurecimiento por precipitación se presente en el material mientras la pintura sobre las carrocerías está siendo sometida a "horneado" o curado ($\sim 100^\circ\text{C}$). Estos aceros endurecidos durante el horneado son sólo un ejemplo de aceros que aprovechan el efecto endurecedor proporcionado por los mecanismos de endurecimiento por envejecimiento.[5]

La figura 11-9(a) ilustra el incremento en la resistencia de un acero endurecible por horneado como resultado del endurecimiento por deformación (capítulo 7) y del endurecimiento por precipitación (en condiciones que simulan la pintura horneada). La figura 11-9(b) muestra el incremento obtenido en las propiedades utilizando aceros endurecibles por horneado. Un pequeño incremento en el límite de cedencia, obtenido después de terminar el proceso de formación de la carrocería del automóvil, representa una importante diferencia para la resistencia contra el abollamiento de los aceros.

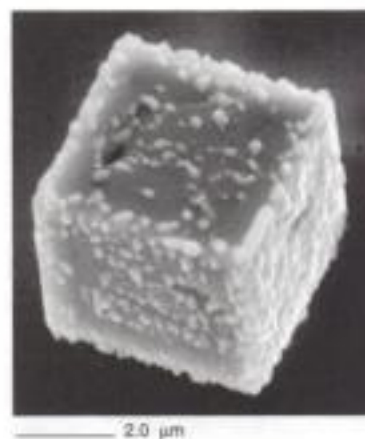
Existen también muchas otras composiciones a base de acero, conocidas como aceros de alta resistencia, baja aleación (HSLA, por sus siglas en inglés) o aceros microaleados, en los



(a)



(b)



(c)

Figura 11-9 (a) Curva de esfuerzo-deformación que muestra el incremento en resistencia de un acero endurecible por hornado, como resultado de endurecimiento por deformación y por precipitación. (Fuente: U.S. Steel Corporation, Pittsburgh, PA.) (b) Gráfica que muestra el incremento en la resistencia de cedencia de un acero endurecible por hornado (Fuente: Bethlehem Steel, PA.) (c) Micrografía electrónica de un acero que contiene niobio (Nb) y manganeso (Mn). El niobio reacciona con el carbono (C) formando precipitados NbC que producen endurecimiento. (Cortesía del Dr. A. J. Deardo, Dr. I. García, Dr. M. Hua, University of Pittsburgh.)

cuales la precipitación de carburo de niobio de tamaño microscópico, carburo de titanio o de nitruros y otros carburos o carbonitruros, proporciona incrementos significativos en la resistencia. La figura 11-9(c) muestra una micrografía electrónica de un precipitado de carburo de niobio formado en el acero.

Un inconveniente asociado con este mecanismo es el hecho de que las aleaciones endurecidas por envejecimiento sólo pueden ser utilizadas en un rango limitado de temperaturas.

Paso 2: Templado Después del tratamiento por solubilización, la aleación, que en su estructura solo contiene α , se enfría rápidamente, es decir, se temple. Los átomos no tienen tiempo para difundirse hacia sitios de nucleación potenciales, por lo que no se forma el θ . Después del templado, la estructura es una **solución sólida sobresaturada** α_{ss} que contiene un exceso de cobre y que no es una estructura en equilibrio; es una estructura metaestable.[6] Esta situación efectivamente es la misma que el subenfriamiento del agua y de los metales fundidos, así como de los vidrios de silicatos que se subenfrian (capítulo 8). La única diferencia es que estamos tratando con materiales en su estado sólido.

Paso 3: Envejecimiento Finalmente, la solución α supersaturada se calienta a una temperatura por debajo de la del solvus. A esta temperatura de *envejecimiento*, los átomos sólo pueden difundirse cortas distancias. Dado que la solución α supersaturada es metaestable, los átomos de cobre adicionales se difunden a numerosos sitios de nucleación y los precipitados crecen. Finalmente, si mantenemos la aleación a la temperatura de envejecimiento durante un tiempo suficiente, se llega a un equilibrio en la estructura $\alpha + \theta$. Obsérvese que aun cuando la estructura formada tiene dos fases de equilibrio (es decir, $\alpha + \theta$), la morfología de las fases es diferente de la estructura que se habría obtenido mediante el enfriamiento lento de esa aleación (Fig. 11-5). Cuando seguimos los tres pasos antes mencionados, producimos la fase θ en forma de partículas ultrafinas de precipitado de segunda fase uniformemente dispersas. Esto es lo que necesitamos para un endurecimiento eficaz por precipitación.

Los siguientes dos ejemplos ilustran el efecto del templado en la composición de fases y un diseño para el tratamiento de endurecimiento por envejecimiento.

EJEMPLO 11-2 Composición de las fases de la aleación Al 4% Cu

Compare la composición de la solución sólida α en la aleación Al 4% Cu a la temperatura ambiente, cuando la aleación se enfría bajo condiciones de equilibrio y con aquella que ocurre cuando la aleación se temple.

SOLUCIÓN

A partir de la figura 11-5 se puede trazar una isoterma a la temperatura ambiente. La composición de α determinada a partir de la isoterma es de aproximadamente 0.02% Cu; sin embargo, la composición de α después del templado sigue siendo 4% Cu. Dado que α contiene un exceso de cobre respecto al equilibrio, α está supersaturada de cobre.

EJEMPLO 11-3 Diseño de un tratamiento de endurecimiento por envejecimiento

El diagrama de fases magnesio-aluminio aparece en la figura 11-11. Suponga que una aleación Mg 8% Al responde a un tratamiento térmico de endurecimiento por envejecimiento. Diseñe un tratamiento térmico para la aleación.

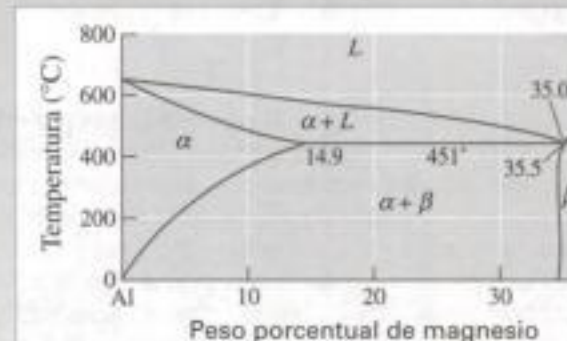


Figura 11-11
Porción del diagrama de
fases magnesio-aluminio.

SOLUCIÓN

- Paso 1: Haga un tratamiento por solubilización a una temperatura entre la del solvus y la eutéctica, a fin de evitar la fusión por microsegregación. Entonces caliente entre 340 °C y 451 °C.
- Paso 2: Temple a la temperatura ambiente lo suficientemente aprisa para impedir que se forme precipitado de fase β .
- Paso 3: Envejezca a una temperatura inferior a la del solvus, esto es, por debajo de 340 °C, a fin de formar una dispersión fina de la fase β .

Precipitados fuera de equilibrio durante el envejecimiento Durante el envejecimiento de las aleaciones aluminio-cobre, se forma una serie continua de otros precipitados precursores antes de la formación del precipitado θ en equilibrio. Esto es bastante común en las aleaciones endurecidas por precipitación. El diagrama simplificado de la figura 11-10 no muestra estas fases intermedias. Al iniciarse el envejecimiento, los átomos de cobre se concentran en los planos {100} de la matriz α , produciendo precipitados muy delgados conocidos como **zonas Guinier-Preston (GP)**. Conforme sigue el envejecimiento, más átomos de cobre se difunden en el precipitado y las zonas GP-I aumentan de espesor formando discos delgados, o zonas GP-II. Al seguir la difusión, los precipitados desarrollan un grado mayor de orden y se conocen como θ' . Al final se produce el precipitado θ estable.

Los precipitados fuera de equilibrio —GP-I, GP-II y θ' — son precipitados coherentes. La resistencia de la aleación aumenta con el tiempo de envejecimiento conforme estas fases coherentes crecen durante las etapas iniciales del tratamiento térmico. Cuando están presentes estos precipitados coherentes, la aleación se encuentra en estado envejecido. La figura 11-12 muestra la estructura de una aleación Al-Ag envejecida. Este desarrollo importante en la evolución de la microestructura de las aleaciones endurecidas por precipitación o envejecimiento es la razón por la cual es muy importante el tiempo del tratamiento térmico durante el envejecimiento. Dado que en las estructuras los cambios ocurren a una nanoescala, no se observa un cambio visible en la estructura de la aleación a una microescala. Ésta es una razón por la cual los mecanismos de endurecimiento por precipitación sólo llegaron a establecerse firmemente hasta la década de 1950 (cuando se inició el uso de los microscopios electrónicos), aun cuando el fenómeno había sido descubierto con anterioridad. En el capítulo 3 (Fig. 3-47), examinamos una imagen de microscopio electrónico de una aleación de aluminio cuya resistencia también fue aumentada utilizando endurecimiento por precipitación.

Cuando se precipita la fase θ estable no coherente, la resistencia de la aleación empieza a decaer. Entonces la aleación está en un estado sobre-envejecimiento. El θ sigue proporcionando algo de endurecimiento por dispersión, pero con el transcurso del tiempo el θ crecerá e incluso el simple efecto del endurecimiento por dispersión se reducirá.



Figura 11-12

Microfotografía electrónica del Al 15% Ag envejecido que muestra placas y θ' coherentes y zonas GP redondas (40 000 $\times$). (Cortesía de J. B. Clark.)

Al envejecimiento tanto a 190 °C como a 260 °C se le conoce como **envejecimiento artificial**, puesto que se calienta la aleación para producir la precipitación. Algunas aleaciones tratadas por solubilización y templadas envejecen a la temperatura ambiente; esto se conoce como **envejecimiento natural**. El envejecimiento natural requiere de largos periodos, a veces varios días, para alcanzar la resistencia máxima. Sin embargo, esta resistencia máxima es superior a la obtenida en el envejecimiento artificial, y no ocurre sobre-envejecimiento.

Una observación interesante hecha por Gayle y sus colaboradores es un ejemplo impresionante de la diferencia existente entre el envejecimiento natural y el artificial.[3] Gayle y sus colaboradores analizaron la aleación de aluminio del motor utilizado en 1903 en el aeroplano de los hermanos Wright; encontraron dos fenómenos interesantes. Primero, que la aleación original había sufrido un endurecimiento por precipitación como resultado de haberse conservado en el molde durante un tiempo a una temperatura suficiente para el endurecimiento por precipitación. Segundo, puesto que la investigación se efectuó desde 1903 hasta cerca de 1993 (casi 90 años), la aleación había continuado su envejecimiento (de manera natural! Esto pudo ser observado a partir de dos distribuciones distintas de tamaño en las partículas del precipitado gracias al microscopio electrónico. En algunas aleaciones de aluminio (identificadas como T4), que se utilizan para la fabricación de varillas cónicas o sujetadores, puede ser necesario refrigerar la aleación para evitar el envejecimiento natural a la temperatura ambiente.[7] De lo contrario, la aleación envejecerá a la temperatura ambiente, endureciéndose y haciéndose imposible de trabajar! Al principio de este capítulo, aparece una microfotografía SEM de la aleación utilizada en el aeroplano de los hermanos Wright.

11-7

Requisitos para el endurecimiento por envejecimiento

No todas las aleaciones pueden ser endurecidas por envejecimiento. Deben satisfacerse cuatro condiciones para que una aleación tenga una respuesta de endurecimiento por envejecimiento durante el tratamiento térmico:

1. El sistema de la aleación debe mostrar una solubilidad sólida decreciente al reducirse la temperatura. En otras palabras, la aleación debe formar una sola fase al ser calentada por arriba del solvus y después pasar a una región de dos fases durante el enfriamiento.
2. La matriz deberá ser relativamente blanda y dúctil; el precipitado, duro y frágil. En la mayoría de las aleaciones endurecibles por envejecimiento, el precipitado es un compuesto intermetálico duro y frágil.
3. La aleación debe poder templarse. Algunas aleaciones no pueden enfriarse con rapidez suficiente para suprimir la formación del precipitado. El templado puede, sin embargo, introducir esfuerzos residuales que causan distorsión en la pieza (capítulo 7). Para minimizar esfuerzos residuales, las aleaciones de aluminio se templean en agua caliente a aproximadamente 80 °C.
4. Debe formarse un precipitado coherente.

Como mencionamos antes en la sección 11-4, un cierto número de aleaciones metálicas de importancia —incluyendo ciertos aceros inoxidables y aleaciones basadas en aluminio, magnesio, titanio, níquel, cromo, hierro y cobre— llenan estas condiciones y son endurecibles por envejecimiento.

11-8

Uso de aleaciones endurecibles por envejecimiento a altas temperaturas

Según el análisis anterior, no se seleccionaría una aleación Al 4% Cu endurecida por envejecimiento para uso a altas temperaturas. A las temperaturas de servicio de 100 °C a 500 °C, la aleación se sobre-envejece y pierde su resistencia. Por encima de los 500 °C, la segunda fase se vuelve a disolver y ni siquiera tendremos endurecimiento por dispersión. En general, las aleaciones de aluminio endurecibles por envejecimiento son más adecuadas para servicio a temperaturas cercanas al ambiente. Sin embargo, algunas aleaciones al magnesio pueden conser-

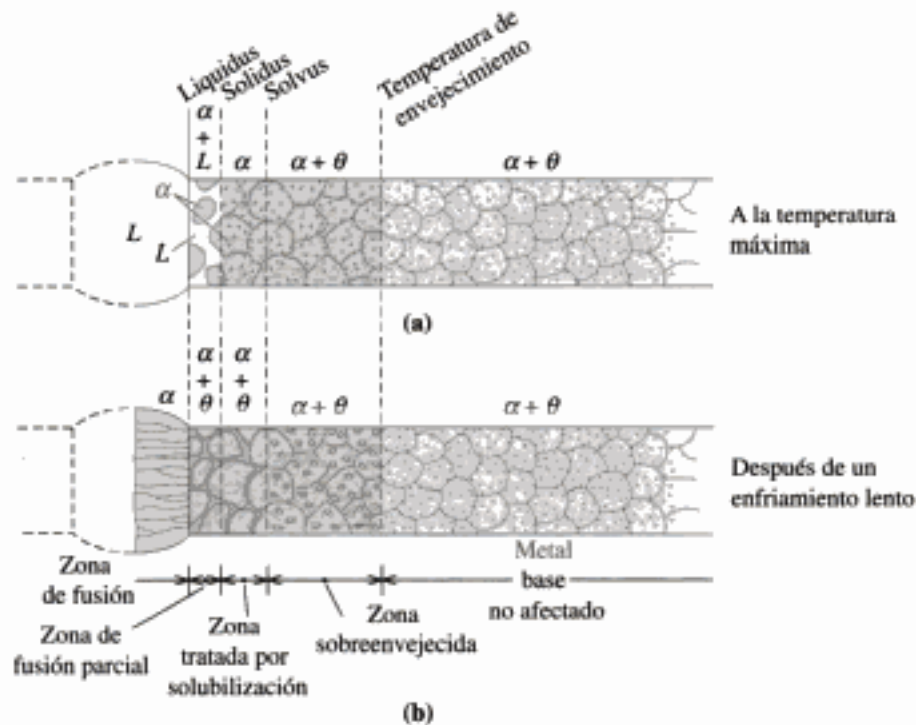


Figura 11-14 Cambios microestructurales que ocurren en las aleaciones endurecidas por envejecimiento durante la soldadura por fusión: (a) microestructura en la soldadura a la temperatura máxima y (b) microestructura de la soldadura después de haberse enfriado lentamente hasta la temperatura ambiente.

var su resistencia hasta aproximadamente 250 °C y ciertas superaleaciones al níquel resisten el sobreenvejecimiento a 1000 °C.

También podríamos encontrar problemas al soldar aleaciones endurecibles por envejecimiento (Fig. 11-14). Durante la soldadura, el metal adyacente se calienta. La zona afectada por el calor (HAZ, por sus siglas en inglés) contiene dos zonas principales. La zona de temperatura inferior cercana al metal base no afectado está expuesta a temperaturas justo por debajo del solvus y puede sobreenvejecer. La zona de temperatura más alta está tratada por solubilización, lo que elimina los efectos del endurecimiento por envejecimiento. Si la zona tratada por solubilización se enfría lentamente, podría formarse una fase θ estable en los límites de granos, haciendo frágil el área de la soldadura. Los procesos de soldadura muy rápidos —como la soldadura por haz de electrones, el tratamiento de recalentamiento completo del área después de soldar, o bien la soldadura de la aleación en el estado de tratamiento por solubilización— mejoran la calidad de la soldadura (capítulo 8). La soldadura de superaleaciones basadas en níquel endurecidas por precipitación no presentan estos problemas, ya que el proceso de precipitación es lento y el proceso de soldadura actúa simplemente como un tratamiento de solución y temple.[2] El proceso de soldadura por agitación a la fricción también se ha aplicado recientemente en la soldadura de aleaciones de Al y de Al Li para usos aeroespaciales y en aeronaves.

11-9

La reacción eutectoide

En el capítulo 10 definimos el eutectoide como una reacción de estado sólido en la cual una fase sólida se transforma en otras dos fases sólidas:



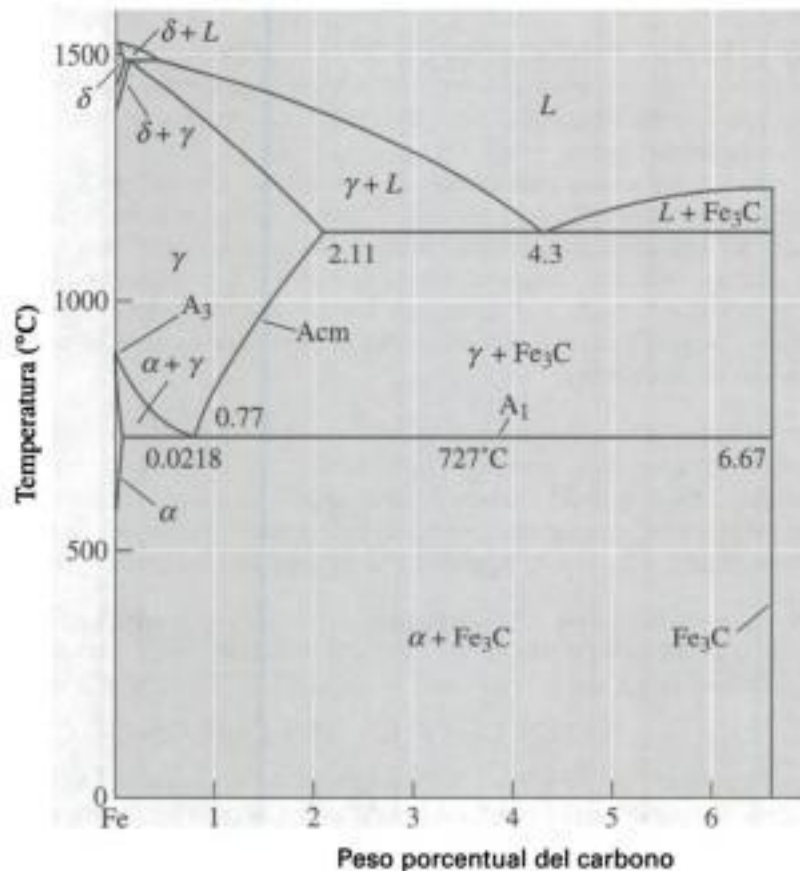


Figura 11-15 Diagrama de fases Fe-Fe₃C (porción del diagrama Fe-C). La línea vertical a 6.67% C es el compuesto estequiométrico Fe₃C.

Como ejemplo de la forma en que podemos utilizar la reacción eutéctica para controlar la microestructura y las propiedades de una aleación, examinemos la porción tecnológicamente importante del diagrama de fase del hierro-carburo de hierro (Fe-Fe₃C) (Fig. 11-15), que es la base de los aceros y de los hierros colados. La formación de las dos fases sólidas (α y Fe₃C) nos permite obtener endurecimiento por dispersión. La posibilidad de controlar la aparición de la reacción eutéctica (lo que incluye hacer que ocurra, reducirla o evitarla completamente) es posiblemente el paso más importante en el procesamiento termomecánico de los aceros. En el diagrama Fe-Fe₃C, la temperatura eutéctica se llama temperatura A₁. La frontera entre la austenita (γ) y el campo de dos fases formado por la ferrita y la ferrita y la austenita se conoce como A₃. La frontera entre la austenita (γ) y el campo de dos fases formado por la cementita y la austenita se conoce como A_{cm}.

Por lo general, no estamos interesados en el extremo rico en carbono del diagrama de fase Fe-C, y ésta es la razón por la cual estudiamos el diagrama Fe-Fe₃C como parte del diagrama de fase binaria Fe-C.

Soluciones sólidas El hierro sufre dos transformaciones alotrópicas (capítulo 3) durante el calentamiento o el enfriamiento. Inmediatamente después de la solidificación, el hierro forma una estructura BCC conocida como ferrita δ . A un mayor enfriamiento, el hierro se transforma en una estructura FCC llamada γ , o **austenita**. Esta fase se llama así en honor a Sir W. C. Robert-Austen, que fue el primero en reportarla.[7] Finalmente, el hierro vuelve a transformarse en una estructura BCC a temperaturas todavía más reducidas; esta estructura se llama α , es decir, **ferrita**. Tanto las ferritas (α y δ) como la austenita son soluciones sólidas de átomos

intersticiales de carbono (ejemplo 4-3). Normalmente, cuando no se hace una referencia específica, el término ferrita se refiere a la ferrita α , ya que ésta es la fase más frecuentemente encontrada durante el tratamiento térmico de los aceros. Ciertos materiales cerámicos utilizados en aplicaciones magnéticas también son conocidos como ferritas (capítulo 14), pero no tienen relación con la fase ferrítica del sistema Fe-Fe₃C.

Dado que los huecos intersticiales en la estructura cristalina FCC son algo mayores que los de la estructura BCC, en un hierro FCC puede acomodarse un número mayor de átomos de carbono. Entonces, la solubilidad máxima del carbono en la austenita es de 2.11% C, en tanto que la solubilidad máxima del carbono en el BCC es muy inferior (es decir ~0.0218% C en α y 0.09% C en δ). Las soluciones sólidas de carbono en el hierro son relativamente blandas y dúctiles, pero más resistentes que el hierro puro gracias al endurecimiento por solución sólida del carbono.

Compuestos Cuando se excede la solubilidad del carbono en el hierro sólido, se forma un compuesto estequiométrico Fe₃C, o **cementita**. El Fe₃C contiene 6.67% C, es extremadamente duro y frágil (parecido a un material cerámico) y está presente en todos los aceros comerciales. Al controlar adecuadamente la cantidad, tamaño y forma del Fe₃C, podemos definir el grado de endurecimiento por dispersión y las propiedades del acero.

La reacción eutectoide Si calentamos una aleación que contenga la composición eutectoide de 0.77% C por encima de los 727 °C, producimos una estructura que sólo contendrá granos de austenita. Cuando la austenita se enfría a 727 °C, empieza la reacción eutectoide:



Al igual que en el caso de la reacción eutéctica, las dos fases que se forman tienen composiciones diferentes, por lo que los átomos deben difundirse durante la reacción (Fig. 11-16). La mayor parte del carbono en la austenita se difunde al Fe₃C, y la mayoría de los átomos de hierro se difunden hacia α . Esta redistribución de los átomos resulta más fácil si las distancias de difusión son cortas, que es el caso cuando α y Fe₃C crecen en forma de laminillas o placas delgadas.

Perlita La estructura laminar de α y de Fe₃C que se desarrolla en el sistema hierro carbono se conoce como **perlita**, que es un microconstituyente en el acero. Fue llamada así porque una perlita pulida y atacada químicamente muestra el colorido de la madreperla.[1] Las laminillas

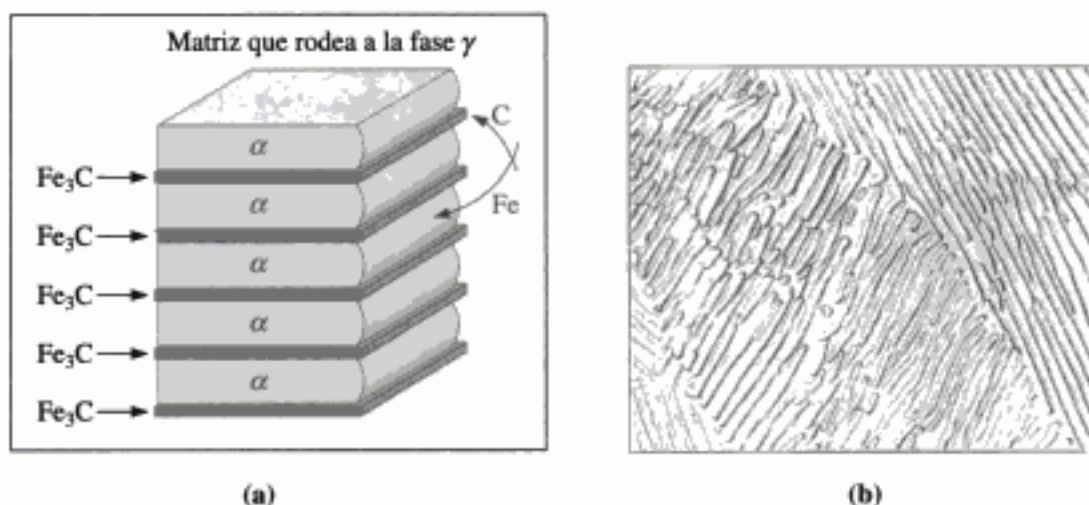


Figura 11-16 Crecimiento y estructura de la perlita: (a) Redistribución del carbono y del hierro y (b) Microfotografía de laminillas de perlita (2000 $\times$). (De ASM Handbook, vol.7 (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073).

en la perlita son mucho más finas que las del eutéctico plomo estaño, porque los átomos de hierro y de carbono deben difundirse a través de austenita sólida, en vez de líquida. Una forma de pensar acerca de la perlita es considerarla como un nanocompuesto metálico cerámico. El siguiente ejemplo muestra el cálculo de las cantidades de las fases en el microconstituyente de perlita.

EJEMPLO 11-5 Fases y composición de la perlita

Calcule las cantidades de ferrita y de cementita presentes en la perlita.

SOLUCIÓN

Dado que la perlita debe contener 0.77% C, utilizando la regla de la palanca:

$$\begin{aligned}\% \alpha &= \frac{6.67 - 0.77}{6.67 - 0.0218} \times 100 = 88.7\% \\ \% \text{Fe}_3\text{C} &= \frac{0.77 - 0.0218}{6.67 - 0.0218} \times 100 = 11.3\%\end{aligned}$$

En el ejemplo 11-5 se observó que la mayor parte de la perlita está compuesta de ferrita. De hecho, si examinamos la perlita de cerca, encontramos que las laminillas Fe_3C están rodeadas por α . Por tanto, la estructura de la perlita proporciona endurecimiento por dispersión, la fase ferrita continua es relativamente blanda y dúctil y la cementita dura y frágil está dispersa. El siguiente ejemplo ilustra las características comunes y las diferencias entre compuestos y perlitas.

EJEMPLO 11-6 Compuesto y perlita de carburo de tungsteno (WC) cobalto (Co)

Los compuestos de carburo de tungsteno cobalto, que se conocen como carburos de tungsteno o simplemente carburos, se utilizan como puntas para herramientas de corte y para brocas (capítulo 1). ¿Qué características son semejantes entre estos “carburos cementados” y la perlita, un microconstituyente presente en los aceros? ¿Cuáles son las principales diferencias?

SOLUCIÓN

La perlita es muy similar a los compuestos de carburo de tungsteno cobalto (WC-Co) conocidos como carburos. Quizá recuerde de capítulos anteriores que los WC-Co son compuestos metálicos cerámicos (conocidos como cermets) y que se utilizan como insertos para herramientas de corte, brocas y barrenos, etc. En ambos materiales, aprovechamos la tenacidad de una fase (ferrita o cobalto metálico, en el caso de la perlita en el acero y en el WC-Co, respectivamente) y una fase dura de tipo cerámico (WC y Fe_3C , en WC-Co y en el acero, respectivamente). La fase metálica aporta la ductilidad; la fase dura, la resistencia. La diferencia consiste en que WC y Co son dos compuestos distintos que se sinterizan juntos utilizando la vía de la metalurgia de los polvos. La perlita es un microconstituyente formado por dos fases derivadas de los mismos dos elementos (Fe y C). Otra diferencia es que, en la perlita, las fases se forman mediante una reacción eutéctica. Esta reacción no ocurre en la formación de los compuestos WC-Co. Comúnmente, la microestructura WC-Co está formada principalmente de granos WC “pegados” por granos de cobalto. En la perlita domina la fase de ferrita similar al metal.

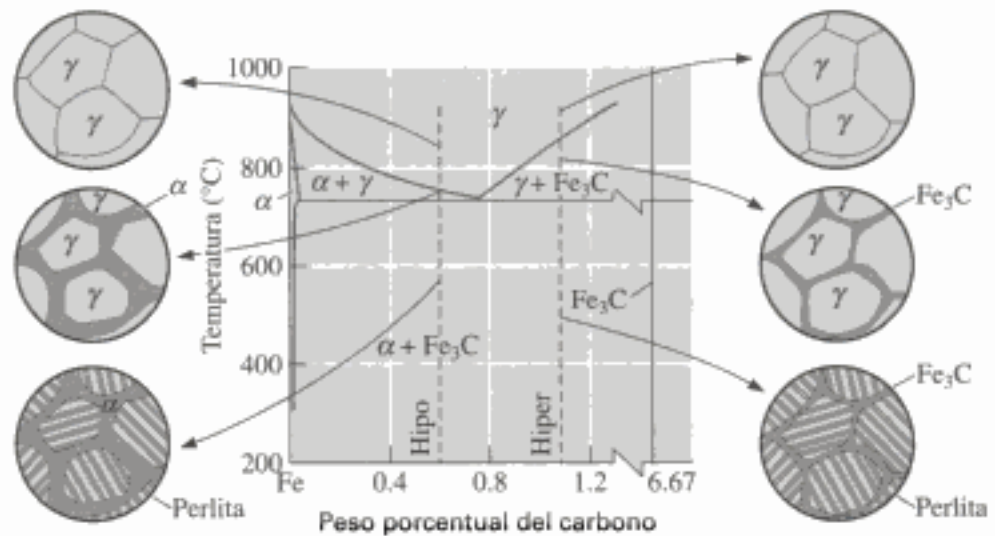


Figura 11-17 Evolución durante el enfriamiento de la microestructura de los aceros hipoeutectoides e hipereutectoides, siempre en relación con el diagrama de fases Fe-Fe₃C.

Microconstituyentes primarios Los aceros hipoeutectoides contienen menos de 0.77% C; los aceros hipereutectoides, más de 0.77% C. La ferrita es el microconstituyente primario o proeutectoide en los aceros hipoeutectoides, y la cementita es el microconstituyente primario o proeutectoide de los aceros hipereutectoides. Si calentamos una aleación hipoeutectoide con 0.60% C por arriba de 750 °C, solamente quedará austenita en la microestructura. La figura 11-17 muestra lo que ocurre al enfriarse la austenita. Justo por debajo de 750 °C, la ferrita se nuclea y crece, por lo general, en los bordes de los granos de austenita. La ferrita primaria sigue creciendo hasta que la temperatura se reduce a 727 °C. La austenita restante a esta temperatura queda rodeada por ferrita y ha cambiado su composición de 0.60% C a 0.77% C. Un enfriamiento adicional por debajo de 727 °C hace que toda la austenita restante se transforme en perlita mediante una reacción eutectoide. La estructura queda con dos fases, ferrita y cementita, organizadas como dos microconstituyentes, es decir, ferrita y perlita primarias. La estructura final tiene islas de perlita rodeadas por la ferrita primaria [Fig. 11-18(a)]. Esta estructura hace que la aleación sea resistente, debido a la perlita endurecida por dispersión, aunque todavía dúctil, debido a la ferrita primaria continua.

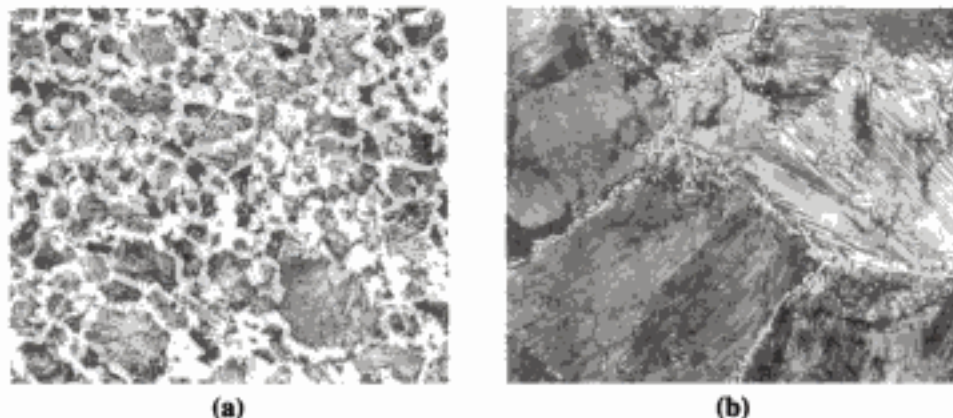


Figura 11-18 (a) Acero hipoeutectoide que muestra α primaria (blanco) y perlita (400 x). (b) Acero hipereutectoide que muestra Fe₃C primario rodeando a la perlita (800 x). (De ASM Handbook, vol. 7, (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073).

TABLA 11-1 ■ Efecto del carbono en la resistencia de los aceros

Enfriamiento lento (perlita gruesa)				Enfriamiento rápido (perlita fina)		
Carbono %	resistencia de cedencia (psi)	Resistencia mecánica de tensión (psi)	% de alargamiento	Resistencia de cedencia (psi)	Resistencia mecánica de tensión (psi)	% de alargamiento
0.20	42 750	57 200	36.5	50 250	64 000	36.0
0.40	51 250	75 250	30.0	54 250	85 500	28.0
0.60	54 000	90 750	23.0	61 000	112 500	18.0
0.80	54 500	89 250	25.0	76 000	146 500	11.0
0.95	55 000	95 250	13.0	72 500	147 000	9.5

De acuerdo con Metals Progress Materials and Processing Databook, 1981.

Control del tamaño de grano de la austenita La perlita crece como granos o *colonias*. Dentro de cada colonia, la orientación de las laminillas es idéntica. Las colonias se nuclean con mayor facilidad en los bordes de los granos de austenita originales. Podemos incrementar el número de colonias de perlita reduciendo el tamaño que originalmente tenían los granos de austenita, por lo general utilizando bajas temperaturas para producir la austenita. Normalmente, podemos incrementar la resistencia de la aleación reduciendo el tamaño de grano original de la austenita incrementando así el número de colonias.

Control de la velocidad de enfriamiento Al incrementar la velocidad de enfriamiento durante la reacción eutectoide, reducimos la distancia a la cual los átomos pueden difundirse. En consecuencia, las laminillas producidas durante la reacción son más finas o están menos separadas unas de otras. Al producir una perlita fina, incrementamos la resistencia de la aleación (tabla 11-1 y Fig. 11-19).

Control de la temperatura de transformación La reacción eutectoide en estado sólido es más bien lenta, y el acero puede enfriarse por debajo de la temperatura eutectoide de

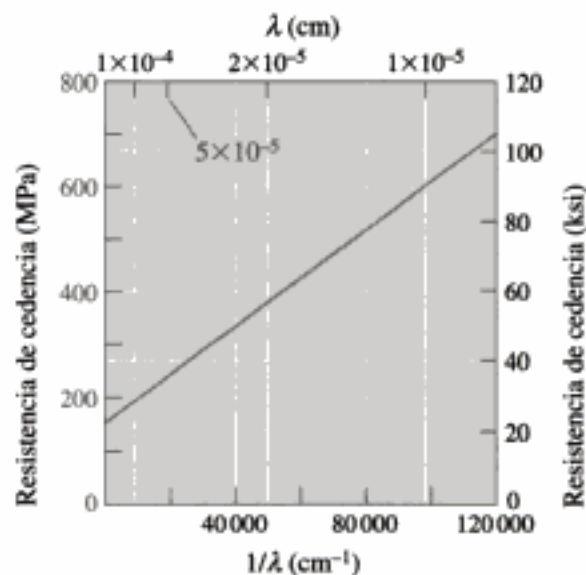


Figura 11-19

Efecto del espaciamiento interlaminar (λ) sobre la resistencia de cedencia de la perlita.

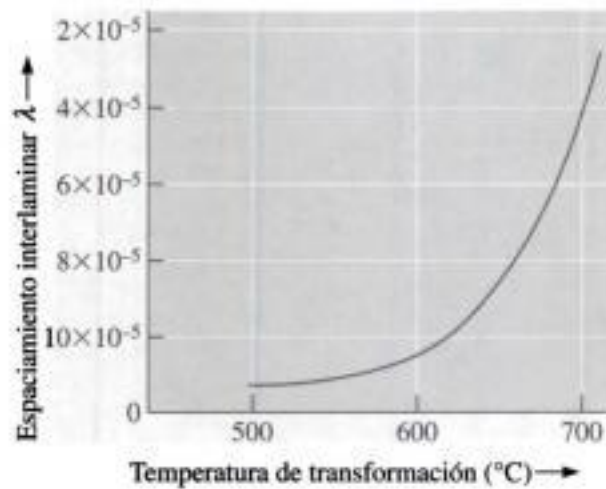


Figura 11-20 Efecto de la temperatura de transformación sobre el espaciamiento interlaminar de la perlita.

equilibrio antes de que se inicie la transformación (es decir, la fase austenítica puede estar subenfriada). Las temperaturas inferiores de transformación generan una estructura más fina y más resistente (Fig. 11-20), influyen acerca del tiempo requerido para la transformación e incluso alteran la organización de las dos fases. Esta información se encuentra en el **diagrama de tiempo-temperatura-transformación (TTT)** (Fig. 11-21). Este diagrama, que también se conoce como **diagrama de transformación isotérmica (IT)**, o bien curva en C, permite predecir la estructura, las propiedades y el tratamiento térmico requerido en los aceros.

La forma del diagrama TTT es consecuencia de la cinética de la reacción eutéctica y es similar al diagrama mostrado en la relación de Avrami (Fig. 11-3). A cualquier temperatura específica, una curva sigmoidea representa la velocidad a la cual la austenita se transforma en una mezcla de ferrita y de cementita (Fig. 11-22). Para la nucleación se requiere de un tiempo de incubación. La curva P_i (inicio de la perlita) representa el momento en el cual la

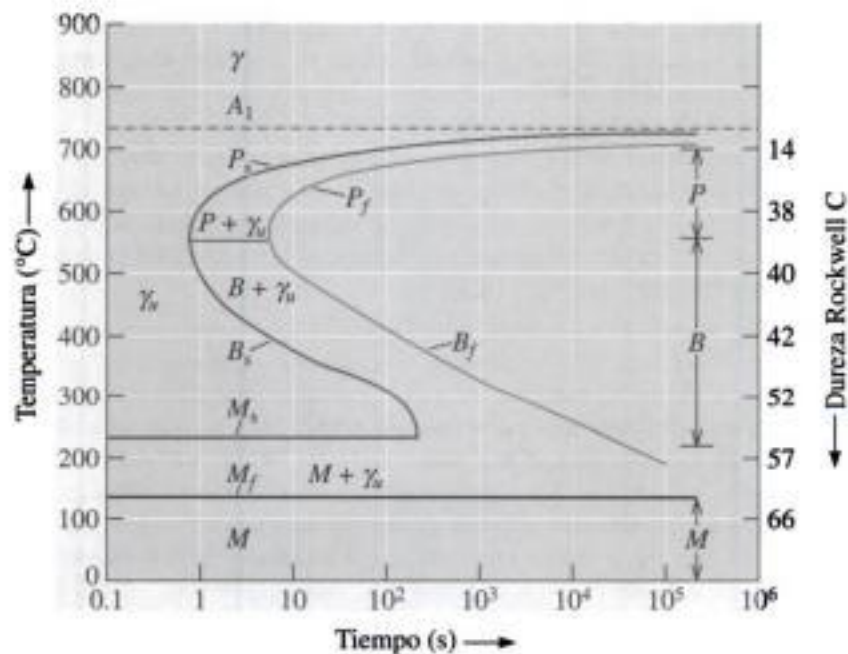


Figura 11-21 Diagrama de transformación-tiempo-temperatura (TTT) para un acero eutéctico.

11-11 La reacción martensítica y el revenido

La **martensita** es una fase que se forma como resultado de una transformación de estado sólido sin difusión. En esta transformación no existe difusión y, por tanto, no se rige por la cinética de transformación de Avrami. La tasa de crecimiento en las transformaciones martensíticas (también conocidas como **transformaciones displasivas** o **atérmicas**) es tan elevada que la nucleación se convierte en el paso de control. La fase que se forma al templarse los aceros fue denominada como "martensita" por Floris Osmond en 1895 en honor al metalúrgico alemán Adolf Martens.[1] Una transformación de fase martensítica similar ocurre también en otros sistemas.

El cobalto, por ejemplo, se transforma de una estructura cristalina FCC en una estructura HCP mediante un ligero desplazamiento de las localizaciones atómicas, lo que altera la secuencia de apilamiento de los planos compactos. Debido a que la reacción no depende de la difusión, la reacción martensítica es una transformación atérmica, esto es, la reacción sólo depende de la temperatura y no del tiempo. La reacción martensítica a menudo avanza con gran rapidez, a velocidades que dentro del material se acercan a la velocidad del sonido.

Muchas otras aleaciones, como por ejemplo Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni y Ni-Ti, muestran transformaciones de fase martensíticas. Estas transformaciones también pueden ser ocasionadas por la aplicación de esfuerzos mecánicos. Además de la martensita que se forma en cierto tipo de aceros, la aleación Ni-Ti, conocida como nitinol (que en inglés representa Nickel Titanium Naval Ordinance Laboratory, desarrollado por el Naval Ordinance Laboratory en la década de 1940), es quizás el ejemplo más conocido de aleaciones que usan las transformaciones de fase martensíticas. Estos materiales pueden recordar su forma anterior y se conocen como aleaciones con memoria de forma (SMA).[9] En la sección 11-12 analizaremos aplicaciones de estos materiales.

Martensita en los aceros En aceros con un poco menos de 0.2% C, la austenita FCC se transforma en una estructura de martensita BCC supersaturada. En aceros de más alto carbono, la reacción martensítica ocurre al transformarse la austenita FCC en martensita BCT (tetragonal)

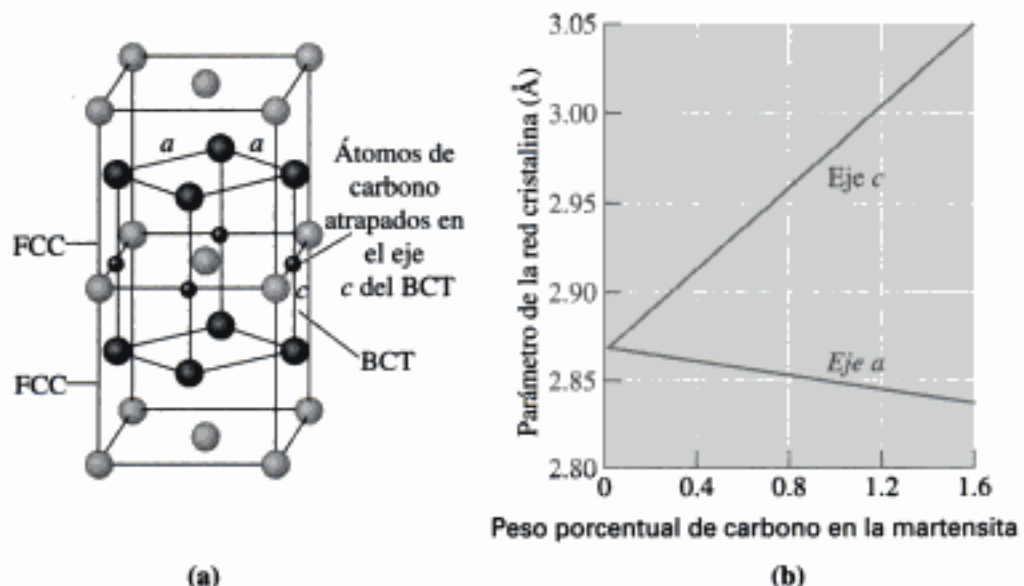


Figura 11-25 (a) La celda unitaria de la martensita BCT está relacionada con la celda unitaria de la austenita FCC. (b) Conforme aumenta el porcentaje de carbono, más sitios intersticiales se llenan de átomos de carbono y la estructura tetragonal de la martensita se vuelve más pronunciada.

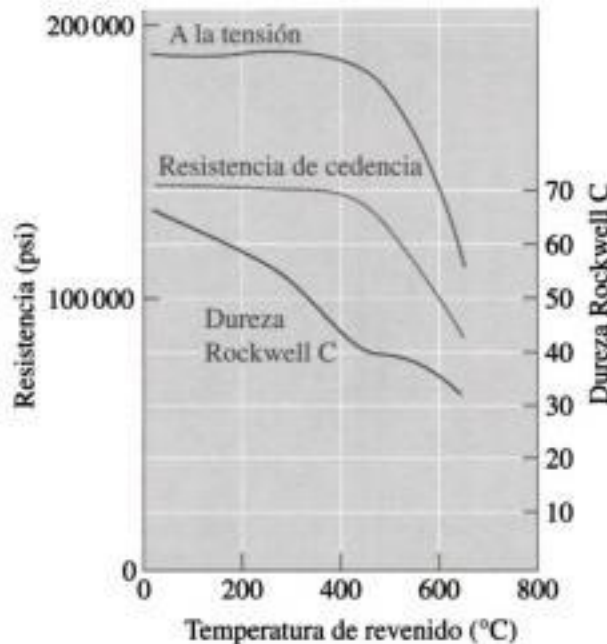


Figura 11-28
Efecto de la temperatura de revenido sobre las propiedades de un acero eutectoide.

las fases α y Fe_3C termodinámicamente estables. Este proceso se conoce como **revenido**. La descomposición de la martensita en los aceros produce la reducción en la resistencia y dureza del acero, mejorando al mismo tiempo la ductilidad y las propiedades al impacto (Fig. 11-28). Nótese que aquí el término *revenido* resulta distinto al término que utilizamos para el templeado de los vidrios de silicatos. Sin embargo, tanto en el templeado de los vidrios como el revenido de los aceros, el resultado clave es un incremento en la tenacidad del material.

A bajas temperaturas de revenido, la martensita puede formar dos fases de transición, una martensita de bajo carbono y un carburo ϵ fuera de equilibrio, es decir Fe_{24}C . El acero sigue siendo resistente, frágil y quizás incluso más duro que antes del revenido. A temperaturas más elevadas, se forman el α y el Fe_3C estables y el acero se hace más blando y dúctil. Si se reviene el acero justo por debajo de la temperatura eutectoide, el Fe_3C se vuelve muy grueso, reduciendo de forma importante el efecto de endurecimiento por dispersión. Seleccionando la temperatura de revenido adecuada, es posible lograr una amplia gama de propiedades. El resultado del proceso de revenido es un microconstituyente llamado martensita revenida (Fig. 11-29).

Martensita en otros sistemas En otros sistemas de aleación, las características de la reacción martensítica son diferentes. Por ejemplo, es posible formar martensita en aleaciones basadas en hierro que contengan poco o nada de carbono, mediante una transformación de la estructura



Figura 11-29
Martensita revenida en el acero (500 $\times$). (De ASM Handbook, vol. 9, Metallography and Microstructure (1985), ASM International Materials Park, OH 44073.)

cristalina FCC a una estructura cristalina BCC. En ciertos aceros al alto manganeso y en los aceros inoxidables, la estructura FCC se cambia a una estructura cristalina HCP durante la transformación martensítica. Además, la reacción martensítica ocurre durante la transformación de muchos materiales cerámicos polimórficos, incluyendo ZrO_2 , e incluso en algunos polímeros cristalinos. Es por eso que los términos *reacción martensítica* y *martensita* son bastante genéricos. Por lo que se refiere a las propiedades, microestructuras y tratamientos térmicos de los aceros, el término *martensita* se refiere a la fase BCT que se obtiene al templar los aceros.

Las propiedades de la martensita en otras aleaciones también son diferentes de las que se presentan en los aceros. En las aleaciones de titanio, el titanio BCC se transforma durante el revenido en una estructura martensítica HCP. Sin embargo, la martensita del titanio es más blanda y débil que la estructura original. La martensita que se forma en otras aleaciones también puede ser revenida. La martensita que se produce en las aleaciones de titanio se puede recalentar para permitir que se precipite una segunda fase. A diferencia de los aceros, sin embargo, el proceso de revenido *incrementa*, en vez de reducir la resistencia de la aleación de titanio.

11-12

Las aleaciones con efecto de memoria de forma (SMA)

El efecto de memoria de la forma es una propiedad única que poseen ciertas aleaciones que siguen una transformación martensítica.[10] Este efecto fue descubierto en 1951 originalmente en las aleaciones de Au-Cd y se le dio mayor importancia después de su descubrimiento en Ni-Ti en el año 1963. Una aleación Ni-50 a % Ti y varias aleaciones basadas en cobre pueden ser procesadas utilizando el tratamiento termomecánico sofisticado para producir una estructura martensítica. Al final del proceso de tratamiento, el metal es deformado a una forma predeterminada. El metal entonces puede ser deformado a una segunda forma; pero, al incrementarse la temperatura, ¡el metal recupera su forma original! Utilizando estos materiales se han desarrollado frenos para ortodoncia, filtros para coágulos de sangre, motores, antenas para teléfonos celulares, armazones para anteojos y accionadores para sistemas inteligentes; se han desarrollado compuertas utilizadas en equipos de aire acondicionado para cambiar la dirección del flujo del aire en función de la temperatura.

Más recientemente, también se ha desarrollado una clase especial de materiales que se conocen como aleaciones ferromagnéticas con memoria de forma. El Ni_2MnGa , $Fe-Pd$ y Fe_3Pt son ejemplos de aleaciones ferromagnéticas con memoria de forma.[10] A diferencia del Ni-Ti, estos materiales muestran un efecto de memoria de forma en respuesta a un campo magnético. La mayoría de las aleaciones comerciales con memoria de forma, incluyendo el Ni-Ti, no son magnéticas. En el capítulo 6 vimos que muchos polímeros son viscoelásticos y que con el transcurso del tiempo el componente viscoso se recupera. Por tanto, ¡muchos polímeros tienen memoria de su forma anterior! Recientemente, los investigadores han desarrollado nuevos plásticos con memoria de forma.[11]

Las aleaciones con memoria de forma tiene una memoria que puede ser iniciada a partir de un cambio en el esfuerzo o en la temperatura.[12] Los **materiales inteligentes** son aquellos que pueden detectar un estímulo externo (como, por ejemplo, deformación, cambio de la temperatura, campo magnético, etc.) y sufren un cambio de algún tipo. Los materiales inteligentes activos incluso pueden iniciar una respuesta (es decir, funcionan como un sensor y un accionador). Las aleaciones con memoria de forma constituyen una familia de materiales inteligentes pasivos, ya que se limitan a detectar un cambio en el esfuerzo o en la temperatura.

Las aleaciones con memoria de forma también despliegan un comportamiento superelástico.[13] Es posible obtener deformaciones recuperables hasta de un 10%. Ésta es la razón por la cual las aleaciones con memoria de forma han tenido tanto éxito en aplicaciones como alambre para ortodoncia, armazones para anteojos, varillas para sostenes y antenas para teléfonos celulares. En esas aplicaciones, aprovechamos el efecto superelástico (no el efecto de memoria de forma). Los ejemplos que siguen ilustran el uso de aleaciones con memoria de forma en diferentes campos de aplicación.

SOLUCIÓN

Podemos pensar en utilizar aleaciones Ni-Ti con memoria de forma. Puede insertarse, en la arteria que ha de expandirse, un *stent* angosto fabricado de una aleación Ni-Ti con memoria de forma. Este *stent* será autoexpandible y se abrirá al alcanzar una cierta temperatura (por ejemplo, a la temperatura interior del cuerpo). Deberá escogerse una composición para la aleación con memoria de forma de manera que el *stent* se expanda a la temperatura del cuerpo (37 °C). Estos tipos de *stents* han sido desarrollados y probados para muchas otras aplicaciones, como en gastroenterología, urología y en lo que se conoce como filtro para vena cava. Otras consideraciones serían: ¿Es el Ni-Ti biocompatible? También deberá tomarse en consideración la resistencia a la corrosión. ¿Será el filtro duradero?

Actualmente, los *stents* cardiovasculares se fabrican principalmente utilizando acero inoxidable 316. Este material no es ferromagnético. Supongamos que el paciente necesita un rastreo de imagen por resonancia magnética (REM) en el cual tanto el cuerpo como los implantes se sujetan a densidades de flujo magnético muy intensas (~1.5 Tesla). Si el material del *stent* es una aleación ferromagnética con memoria de forma, el *stent* se encogerá y se desplazará. Por tanto, estos materiales deben ser descartados.

En consecuencia, especialmente en el caso de aplicaciones biomédicas, debe tomarse en consideración con sumo cuidado toda una serie de cuestiones, como son, por ejemplo, el uso de un material no magnético, su biocompatibilidad, resistencia a la corrosión, propiedades mecánicas y durabilidad. También, lo más probable es que el costo del material o del *stent* representará una pequeña función en el costo total del procedimiento.

RESUMEN

- Las transformaciones de fase en estado sólido, que tienen un efecto profundo sobre la estructura y las propiedades de un material, pueden ser controladas mediante tratamientos térmicos apropiados. Estos tratamientos térmicos se diseñan para proporcionar una distribución óptima de dos o más fases en la microestructura. El endurecimiento por dispersión permite obtener una amplia variedad de estructuras y de propiedades.
- Estas transformaciones suelen requerir tanto la nucleación como el crecimiento de nuevas fases a partir de la estructura original. La cinética de la transformación de fases ayuda a comprender los mecanismos que controlan la reacción y la velocidad a la cual ésta ocurre, lo que permite diseñar un tratamiento térmico para producir la microestructura deseada. La consulta de diagramas de fase apropiados también ayuda a seleccionar las composiciones y temperaturas necesarias.
- El endurecimiento por envejecimiento o por precipitación es un método poderoso para controlar el endurecimiento óptimo por dispersión de muchas aleaciones metálicas. En el endurecimiento por envejecimiento, se permite la formación de un precipitado coherente muy fino y ampliamente disperso, mediante un tratamiento térmico que incluye a) tratamiento por solución para producir una solución sólida de una sola fase, b) templado para retener esa fase única y c) envejecimiento para permitir la formación de un precipitado. A fin de que ocurra el endurecimiento por envejecimiento, el diagrama de fases debe mostrar una solubilidad decreciente del soluto en el solvente al reducirse la temperatura.
- Las aleaciones de aluminio, los aceros inoxidables y los aceros endurecibles en horno son apenas unos cuantos ejemplos de materiales reforzados mediante el endurecimiento por precipitación.
- La reacción eutécticoide puede ser controlada a fin de permitir que un tipo de sólido se transforme en dos tipos de sólidos distintos. La cinética de la reacción depende de la nucleación

de las nuevas fases sólidas y de la difusión de los diferentes átomos en el material para permitir el crecimiento de las nuevas fases.

- La reacción eutectoide de más amplio uso se presenta en la producción de aceros a partir de aleaciones hierro-carbono: se puede producir perlita o bainita como resultado de la reacción eutéctica en el acero. Además, podrían estar presentes ferritas o cementitas primarias, dependiendo del contenido de carbono de la aleación. La idea es formular una microestructura formada de la mezcla correcta de fases parecidas al metal, que son tenaces, y de fases de tipo cerámico, que son duras y frágiles.
- Los factores que influyen sobre las propiedades mecánicas del microconstituyente producido por la reacción eutectoide incluyen: a) la composición de la aleación (cantidad de microconstituyente eutectoide), b) el tamaño de grano del sólido original —es decir, del microconstituyente eutectoide y de cualquier otro microconstituyente primario—, c) la fineza de la estructura dentro del microconstituyente eutectoide (espaciamiento interlaminar), d) la velocidad de enfriamiento durante la transformación de fase y e) la temperatura a la cual ocurre la transformación (la cantidad de subenfriamiento).
- Una reacción martensítica ocurre sin difusión de largo alcance. De nuevo, el ejemplo mejor conocido se presenta en los aceros:
 - La cantidad de martensita que se forme dependerá de la temperatura de la transformación (reacción a térmica).
 - La martensita es muy dura y frágil; su dureza la determina principalmente el contenido de carbono.
 - La cantidad y composición de la martensita son las mismas que las de la austenita de la cual proviene.
- La martensita se puede revenir. Durante el revenido se produce una estructura endurecida por dispersión. En los aceros, el revenido reduce la resistencia y la dureza, pero mejora la ductilidad y la tenacidad.
- En vista de que mediante un tratamiento térmico se pueden obtener las propiedades óptimas, debemos recordar que la estructura y las propiedades pueden cambiar al utilizar el material o al exponerlo a temperaturas elevadas. Al poner el material en servicio, éste se sobreenviejera o se sobrerevenirá, como consecuencia natural de los fenómenos que rigen a estas transformaciones.
- Las aleaciones con memoria de forma (por ejemplo, Ni-Ti) son una clase de materiales inteligentes que pueden recordar su forma anterior. También exhiben un comportamiento superelástico. Dependen de las transformaciones de fase martensíticas que se presentan como resultado de esfuerzos o cambios en la temperatura. Las aleaciones con memoria de forma son útiles en aplicaciones biomédicas y otras.

GLOSARIO

Aceros endurecibles en horno Son aceros que pueden mostrar un incremento en su esfuerzo de cedencia como resultado de un endurecimiento por precipitación que ocurre a temperaturas relativamente bajas ($\sim 100^\circ\text{C}$), en condiciones que simulan la pintura horneada de los automóviles. Con este aumento adicional se logra una mejor resistencia al abollamiento.

Ángulo diedro Ángulo que define la forma de una partícula de precipitado en la matriz. El ángulo diedro se determina por las energías superficiales relativas de la energía del límite de grano de la matriz y la energía interfacial del precipitado y la matriz.

Austenita Nombre dado a la estructura cristalina FCC del hierro.

Bainita Un microconstituyente de dos fases que contiene ferrita y cementita; se forma en los aceros transformados isotérmicamente a temperaturas relativamente bajas.

Cementita Compuesto duro y frágil de composición Fe_3C parecido a los cerámicos que, cuando es dispersado adecuadamente, proporciona endurecimiento en los aceros.

Comportamiento superelástico Las aleaciones con memoria de forma cuando se les deforma por encima de una temperatura crítica presentan una gran deformación elástica como resultado de una transformación martensítica inducida por un esfuerzo.

Diagrama TTT El diagrama tiempo-temperatura-transformación que describe el tiempo requerido a cualquier temperatura para que una transformación de fase empiece y termine. El diagrama TTT supone que durante la transformación la temperatura es constante.

Efecto de memoria de la forma Capacidad de ciertos materiales para poder desarrollar microestructuras que, después de ser deformadas, pueden devolver el material a su forma inicial al ser calentados (por ejemplo, aleaciones Ni-Ti).

Endurecimiento por envejecimiento Tratamiento térmico especial de endurecimiento por dispersión. Mediante un tratamiento por solución, un templeado y un envejecimiento se forma un precipitado coherente que logra un efecto significativo de endurecimiento. También conocido como endurecimiento por precipitación, es una forma de endurecimiento por dispersión.

Energía de deformación Energía requerida para permitir que un precipitado se ajuste en la matriz que lo rodea durante la nucleación y el crecimiento del mismo.

Energía interfacial Energía asociada con los bordes o límites entre dos fases.

Envejecimiento artificial Recalentado de una aleación tratada por solución y templada a una temperatura por debajo del solvus, a fin de conseguir la energía térmica necesaria para que se forme un precipitado.

Envejecimiento natural Cuando se forma un precipitado coherente a partir de una aleación tratada por solución, templada y endurecible por envejecimiento a la temperatura ambiente, lográndose un endurecimiento óptimo.

Estructura Widmanstätten La precipitación de una segunda fase partiendo de la matriz cuando existe una relación cristalográfica fija entre el precipitado y las estructuras cristalinas de la matriz. En esta estructura a menudo se forman estructuras en forma de aguja o en forma de placas.

Ferrita Nombre dado a la estructura cristalina BCC del hierro que puede ocurrir como α o como δ . No debe confundirse lo anterior con las ferritas cerámicas que son materiales magnéticos con estructuras de espinel o espinel inverso.

Martensita Fase metaestable formada en el acero y en otros materiales a causa de una transformación a térmica sin difusión.

Materiales inteligentes Son aquellos que pueden detectar un estímulo externo (como, por ejemplo, esfuerzo, presión, cambio de la temperatura, campo magnético, etc.) e iniciar una respuesta. Los materiales inteligentes pasivos pueden detectar estímulos externos; los materiales inteligentes activos tienen capacidades de detección y de accionamiento.

Perlita Microconstituyente laminar de dos fases que contiene ferrita y cementita, se forma en los aceros enfriados de manera normal o transformados isotérmicamente a temperaturas relativamente altas.

Precipitado coherente Precipitado cuya estructura cristalina y arreglo atómico tiene una relación de continuidad con la matriz de la cual se formó. El precipitado coherente aporta una modificación excelente del arreglo atómico en la matriz, generando un óptimo endurecimiento.

Relación de Avrami Regla que describe la fracción de una transformación ocurrida en función del tiempo. Lo anterior describe la mayoría de las transformaciones que incluyen la difusión, por lo que las transformaciones martensíticas no quedan incluidas.

Revenido Tratamiento térmico a baja temperatura que se utiliza para reducir la dureza de la martensita al permitir que ésta empiece a descomponerse hacia las fases de equilibrio. Esto conduce a obtener una tenacidad mayor.

Solución sólida sobresaturada Solución sólida formada al enfriar rápidamente un material a partir de una región de una sola fase de alta temperatura a una región de dos fases de baja temperatura sin que se precipite la segunda fase. Dado que la fase de temple contiene más elementos de aleación que el límite de solubilidad, queda sobresaturada en ese elemento.

Transformación atermica Cuando la cantidad de transformación depende sólo de la temperatura, y no del tiempo (igual que en el caso de la transformación martensítica o displasiva).

Transformación displasiva Una transformación de fase que ocurre a través de pequeños desplazamientos de átomos o iones y sin difusión. Es lo mismo que la transformación atermica o martensítica.

Transformación isotérmica La que ocurre cuando la cantidad de una transformación a una temperatura en particular depende del tiempo permitido para que suceda.

Transformación martensítica Transformación de fase que ocurre sin difusión. Como la transformación atermica o displasiva. Ocurre en aceros, Ni-Ti y muchos materiales cerámicos.

Tratamiento por solubilización Primer paso en el tratamiento térmico de endurecimiento por envejecimiento. La aleación se calienta por arriba de la temperatura de solvus para disolver cualquier segunda fase y producir una estructura homogénea de una sola fase.

Zonas Guinier-Preston (GP) Pequeños grupos de átomos que se precipitan de la matriz en las primeras etapas del proceso de endurecimiento por envejecimiento. Aunque las zonas GP son coherentes con la matriz, resultan demasiado pequeñas para proporcionar un endurecimiento óptimo.

INFORMACIÓN
ADICIONAL

1. VERHOEVEN, J.D. *Fundamentals of Physical Metallurgy*, Wiley, 1975.
2. WEIDMANN, G., P. LEWIS y N. REID. *Structural Materials (Materials in Action Series)*, ed. y N. REID. The Open University, Butterworth Heinemann, 1990.
3. GAYLE, F.W. y M. GOODWAY. "Precipitation Hardening in the First Aerospace Aluminum Alloy: The Wright Flyer Crankcase", *Science*, 266(5187), 1994, pp. 1015-1017.
4. HORNBOGEN, E. "Precipitation Hardening—The Oldest Nanotechnology", *Metall* (Isernhagen, Germany), 55(9), 2001, pp. 522-526.
5. BELANGER, P.J. *et al.* "Evolution of IF-Based Steel for Exposed Applications at Daimler-Chrysler in North America", en *IF Steels 2000 Proceedings*, Pittsburgh: Iron and Steel Society, Warrendale, Pa., 2000.
6. BERGERON, C.G. y S.H. RISBUD. *Introduction to Phase Equilibria*. American Ceramic Society, 1984.
7. HARPER, C.A. *Handbook of Materials Product Design*. 3a. ed., McGraw Hill, 2001.
8. BAIN, E.C. y E.S. DAVENPORT. *Trans. AIME*, 90, 1930, p. 117.
9. FRIEND, C.M. y N.B. MORGAN. "Shape-Memory Alloys in Medicine—from New Prosthetic Devices to 'Cuddly' Instruments", en *Medical Applications for Shape-Memory Alloys (SMA)*, 1999.
10. KAKESHITA, T. y K. ULLAKKO. "Giant Magnetostriction in Ferromagnetic Shape-Memory Alloys", *MRS Bulletin*, 27(2), 2002, p. 91.
11. LENDELIN, A., A. SCHMIDT y R. LANGER. *Proc. Natl. Acade. Sci. USA*, 98, 2001, p. 842.
12. OTSUKA, K. y WAYMAN, C.M. *Shape-Memory Materials*, 1a. ed., Cambridge, Cambridge University Press, 1998.
13. OTSUKA, K. y T. KAKESHITA. "Science and Technology of Shape-Memory Alloys: New Developments", *MRS Bulletin*, 27(2), 2002.

14. HARRISON, J.D. y D.E. HODGSON, eds. *Shape-Memory Effects in Alloys*, ed. J. PERKINS, Plenum Publisher, Nueva York, 517, 1975.
15. JOST, C. y V. KUMAR. "Are Current Cardiovascular Stents MRI Safe?" *J. Invas. Cardiology*, 10(8), 1998, pp. 477-479.

✓ PROBLEMAS

Sección 11-1 Nucleación y crecimiento en reacciones de estado sólido

- 11-1 ¿Cómo difiere la ecuación de la nucleación de una fase en un estado sólido de la correspondiente a una transformación de líquido a sólido?
- 11-2 Determine las constantes c y n de la ecuación 11-2 que describen la velocidad de cristalización del polipropileno a 140 °C (véase la figura 11-31).

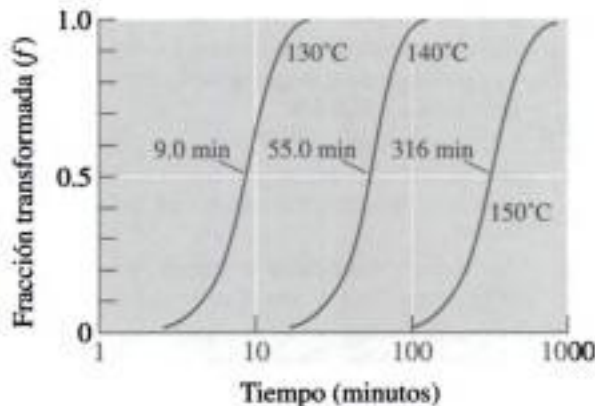


Figura 11-31 Efecto de la temperatura sobre la cristalización del polipropileno (para los problemas 11-2, 11-4 y 11-106).

- 11-3 Determine las constantes c y n de la ecuación 11-2 que describen la velocidad de cristalización del cobre a 135 °C (véase la figura 11-2).
- 11-4 Determine la energía de activación para la cristalización del polipropileno, utilizando las curvas de la figura 11-36 (de la página 539).

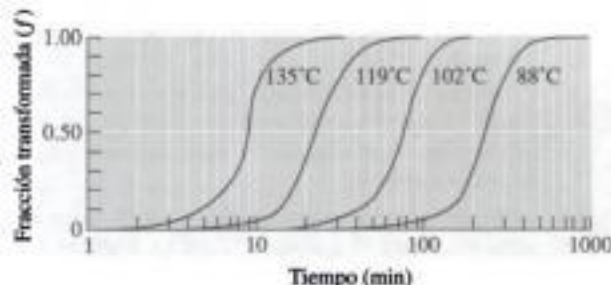


Figura 11-2 (Repetida para el problema 11-3). Efecto de la temperatura sobre la recristalización del cobre al trabajar en frío.

- 11-5 La mayoría de las transformaciones de fase en estado sólido siguen la ecuación de Avrami. Verdadero o falso. Analice brevemente.
- 11-6 ¿Cuál es el paso que controla la velocidad de recristalización de un metal trabajado en frío?

Sección 11-2 Aleaciones endurecidas al exceder el límite de solubilidad

- 11-7 ¿Cuáles son las diferentes maneras mediante las cuales se puede hacer que una segunda fase se precipite en una microestructura de dos fases?
- 11-8 Explique por qué, al ser enfriado lentamente, se nuclea la segunda fase de las aleaciones Al-4% Cu y crece a lo largo de los límites de grano. ¿Es esto normalmente deseable?
- 11-9 ¿Qué significan los términos "precipitado coherente" y "precipitado incoherente"?
- 11-10 ¿Qué propiedades de la fase de precipitado se necesitan para el endurecimiento por precipitación? ¿Por qué?

Sección 11-3 Endurecimiento por envejecimiento o precipitación

- 11-11 ¿Cuál es el principio del endurecimiento por precipitación?
- 11-12 ¿Cuál es la diferencia entre el endurecimiento por precipitación y el endurecimiento por dispersión?
- 11-13 ¿Qué es una solución sobresaturada? ¿Cómo podemos obtener soluciones sobresaturadas durante el endurecimiento por precipitación? ¿Por qué es necesaria la formación de una solución sobresaturada?
- 11-14 ¿Por qué se forman los precipitados generados durante el endurecimiento por precipitación a todo lo largo de la microestructura y no sólo en los límites de grano?
- 11-15 Si se envejece durante periodos más largos, ¿por qué crecen los precipitados de segunda fase? ¿Cuál es la fuerza motriz? Compare lo anterior con las fuerzas motrices para el crecimiento de granos y la sinterización en estado sólido.
- 11-16 a) recomiende un tratamiento térmico por endurecimiento por envejecimiento artificial para una aleación Cu-1.2% Be. (véase la figura 11-34 de la página 537). Incluya las temperaturas apropiadas.
b) Compare la cantidad de precipitado γ_2 que se forma por envejecimiento artificial a 400 °C con

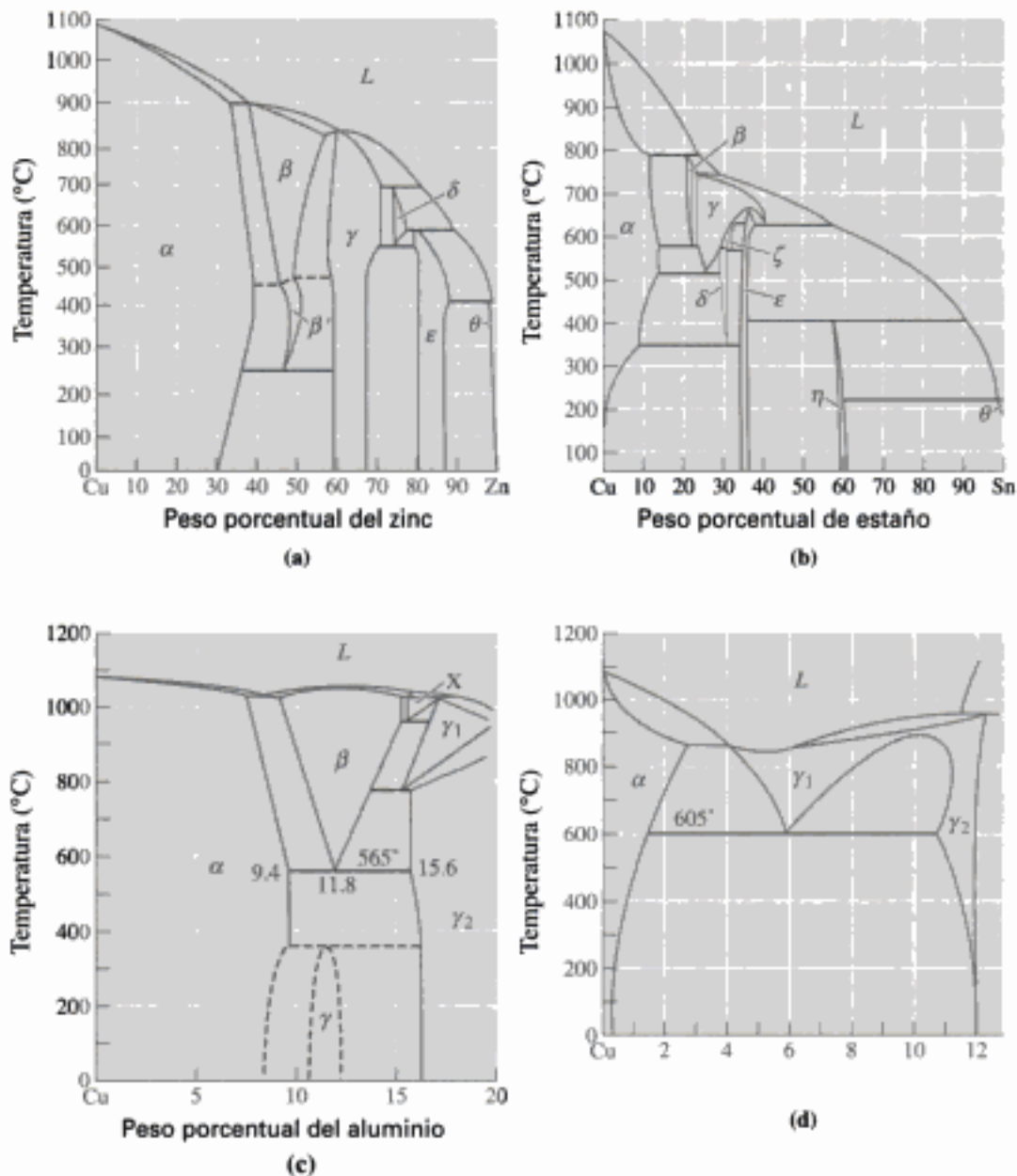


Figura 11-34 Diagramas binarios de fases para el (a) cobre-zinc, (b) cobre-estaño, (c) cobre-aluminio y (d) sistemas cobre-berilio (para los problemas 11-16 y 11-62).

- 11-69 ¿A qué se debe que la bainita y la perlita no aparezcan en el diagrama Fe-Fe₃C? ¿Se trata de fases o de microconstituyentes?
- 11-70 ¿Cuál es la razón por la que no podemos utilizar los diagramas TTT para describir los perfiles de tratamiento térmico en los cuales las muestras se están enfriando durante un cierto tiempo (es decir, por qué son los diagramas TTT solamente adecuados para seguir transformaciones isotérmicas)?
- 11-71 ¿Qué es la bainita? ¿Por qué los aceros que contienen bainita exhiben un grado más elevado de tenacidad?
- 11-72 Se ha encontrado que un acero eutectoide isotérmicamente transformado tiene una resistencia de cedencia de 410 MPa. Estime
- la temperatura de transformación y
 - el espaciamiento interlaminar en la perlita.
- 11-73 Determine la temperatura requerida de transformación y el microconstituyente para lograr que un acero eutectoide alcance los siguientes valores de dureza:
- HRC 38
 - HRC 42
 - HRC 48
 - HRC 52



El diseño apropiado de los tratamientos térmicos permite que el ingeniero pueda controlar la microestructura y las propiedades mecánicas de las aleaciones metálicas. En este ejemplo, el comportamiento polimórfico de una aleación no ferrosa de titanio hace posible la formación de placas α de titanio en una matriz de titanio β . La estructura en forma de placas interfiere con el crecimiento de las grietas, mejorando, por lo tanto, la tenacidad de la aleación a la fractura. (ASM Handbook, vol. 2, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Alloys* (1990), ASM International, Materials Park, OH 44073.)

PARTE 3

CAPÍTULO 12

Aleaciones ferrosas

CAPÍTULO 13

Aleaciones no ferrosas

CAPÍTULO 14

Materiales cerámicos

CAPÍTULO 15

Polímeros

CAPÍTULO 16

Materiales compuestos: trabajo en equipo y sinergia en los materiales

CAPÍTULO 17

Materiales para la construcción

Materiales de ingeniería

Las propiedades mecánicas de los materiales pueden predecirse y controlarse al comprender el enlace atómico, el arreglo atómico y los mecanismos de endurecimiento analizados en las secciones anteriores. Este hecho es particularmente evidente en los capítulos 12 y 13, en los cuales las ideas de endurecimiento por solución sólida, endurecimiento por deformación y endurecimiento por dispersión son aplicadas a las aleaciones ferrosas y no ferrosas.

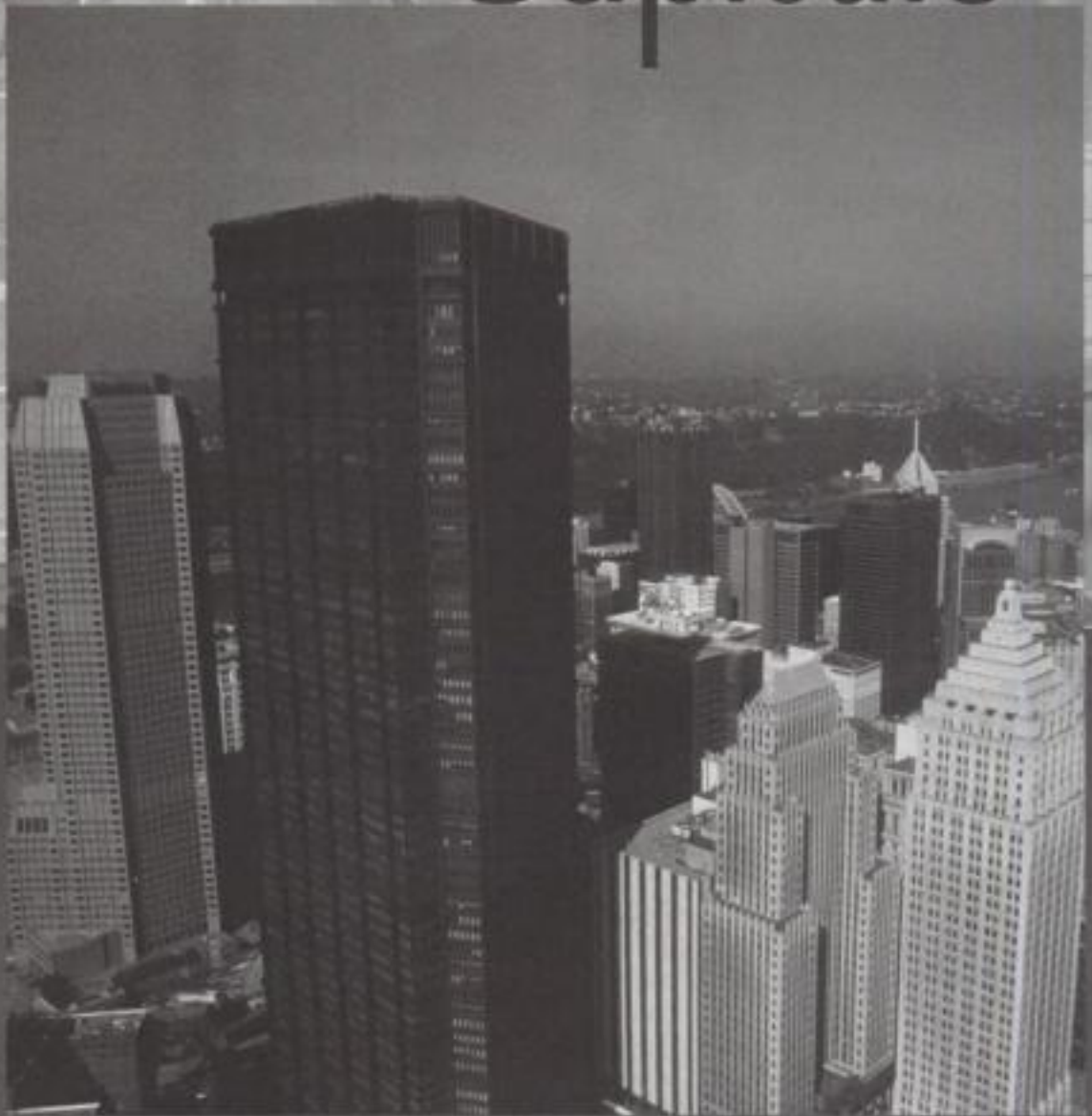
El análisis de los materiales cerámicos y de los polímeros de los capítulos 14 y 15 destaca la importancia de la unión atómica y del arreglo atómico correspondiente. Las propiedades mecánicas de los materiales cerámicos y de los polímeros se explican en dichos capítulos meditando en mecanismos que no involucran el movimiento de dislocaciones.

Los materiales compuestos son aún más difíciles de clasificar, debido a los muchos tipos existentes y en razón de su pretendido uso, como se hace notar en el capítulo 16. Muchos compuestos están diseñados para proporcionar características especiales que exceden los métodos convencionales para controlar la relación estructura-propiedad. Materiales para la construcción, como la madera y el concreto, descritos en el capítulo 17, son tipos especiales de materiales "compuestos".

Frecuentemente encontramos componentes y estructuras complejas hechas a partir de varios o incluso de todos estos grupos. Cada uno de estos grupos tiene su propio conjunto de propiedades que se adecuan mejor a la aplicación de que se trate.

By Arkanosant...

Capítulo



Los aceros constituyen la familia de materiales de mayor uso para aplicaciones estructurales y de carga. La mayoría de los edificios, puentes, herramientas, automóviles y otras numerosas aplicaciones utilizan aleaciones ferrosas. Gracias a una amplia variedad de tratamientos térmicos que proporcionan una gran diversidad de microestructuras y de propiedades, los aceros son posiblemente la familia más versátil de entre los materiales de ingeniería.

*Oro es para el ama; plata, para la doncella;
cobre para el artesano, hábil en su oficio.
"¡Bien!" —dijo el Barón, sentado en su baronía,
"¡pero el hierro —el frío hierro— es quien manda a todos ellos!"*

—Rudyard Kipling
(Cortesía de PhotoDisc/Getty Images.)

Copyrighted material

Aleaciones ferrosas

¿Alguna vez se preguntó...

- ...cuál es el material de ingeniería de más amplio uso?
- ...qué es lo que hace que los aceros inoxidable sean inoxidable?
- ...cuál es la diferencia entre hierro fundido y acero?
- ...son magnéticos los aceros inoxidable?
- ...las latas estañadas se fabrican con estaño?
- ...se utiliza el polvo de hierro de alta pureza como complemento en los cereales del desayuno?

Las aleaciones ferrosas, basadas en aleaciones hierro-carbono, incluyen los aceros al bajo carbono, los aceros aleados y para herramientas, los aceros inoxidable y los hierros fundidos. Éstos son los materiales más ampliamente utilizados en el mundo. En la historia de la civilización, estos materiales dejaron su huella al definir la *Edad de Hierro*.^[1] Los aceros se producen generalmente de dos maneras: refinando el mine-

ral de hierro o reciclando la chatarra de acero (Fig. 12-1).

En la producción del acero de primera fusión, el mineral de hierro (procesado para que contenga de 50 a 70% de óxido de hierro, Fe_2O_3 o Fe_3O_4) se calienta en un *alto horno* en presencia de coque (un refinado del carbón mineral) y oxígeno (Fig. 12-1). El coque desempeña una doble función: es el combustible para el alto horno y también es

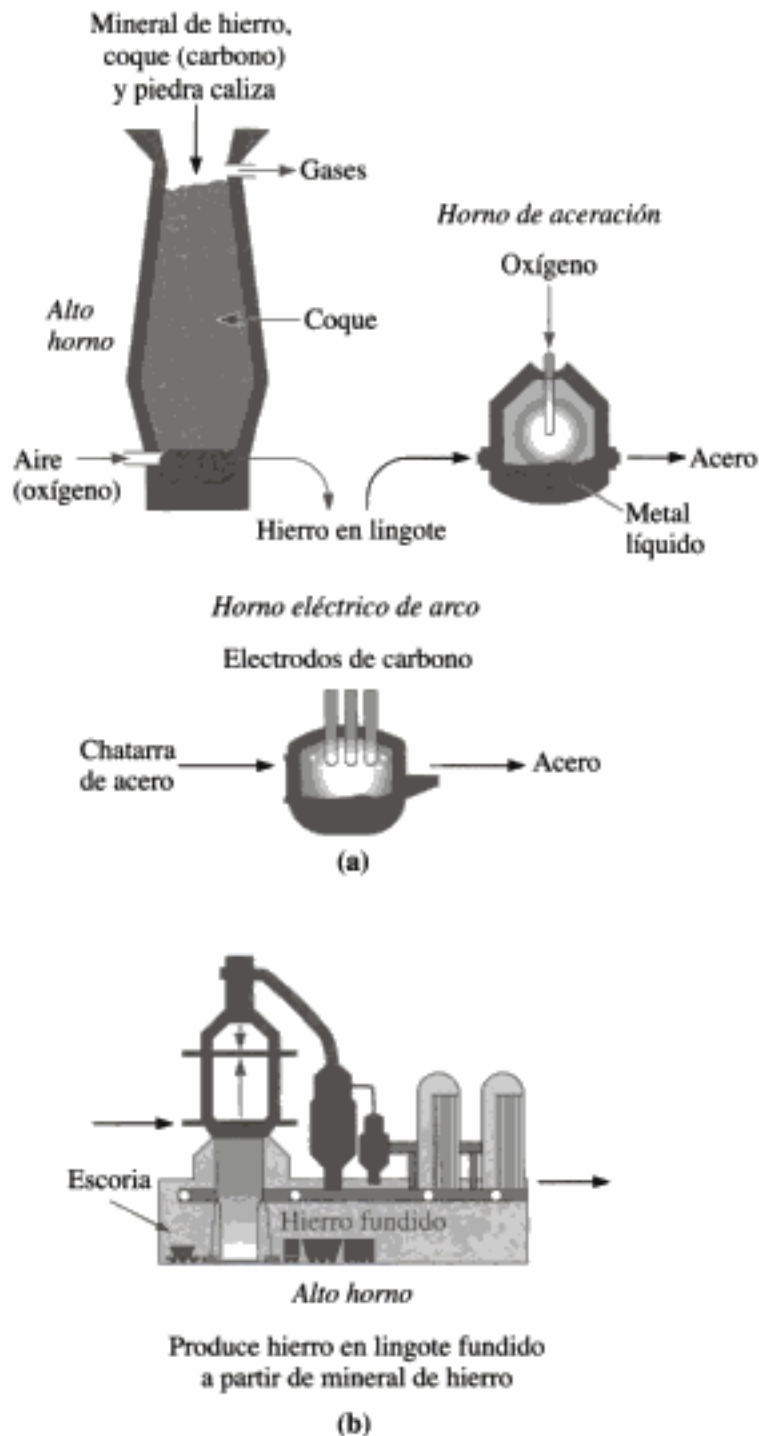


Figura 12-1 (a) En un alto horno, el mineral de hierro se reduce utilizando coque (carbono) y aire a fin de producir hierro en lingote líquido. El alto contenido de carbono en el hierro en lingote se reduce introduciendo oxígeno dentro del horno de oxígeno básico para producir acero líquido. Se puede utilizar un horno eléctrico de arco para producir acero líquido fundiendo chatarra de hierro. (b) Esquema de operación de un alto horno. (Fuente: www.steel.org. Usado con permiso de American Iron and Steel Institute.)

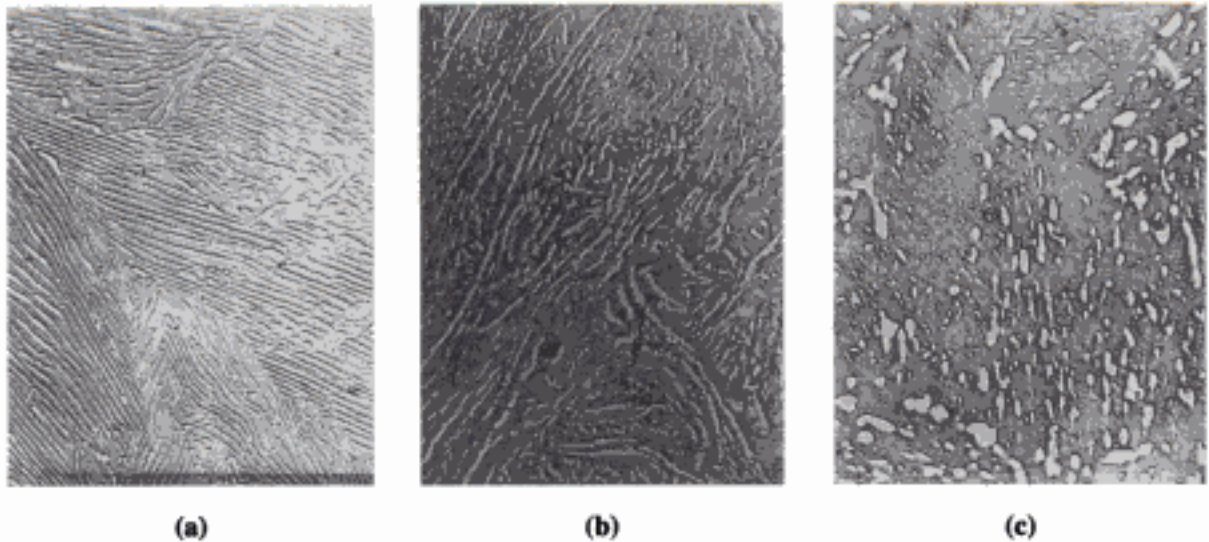


Figura 12-3 Microfotografías electrónicas de (a) perlita, (b) bainita y (c) martensita revenida, que ilustran las diferencias en el tamaño y forma de la cementita en estos tres microconstituyentes (7500 x). (De *The Making, Shaping, and Treating of Steel*, 10a. ed., cortesía de la Association of Iron and Steel Engineers.)

Casi todos los tratamientos térmicos del acero tienen como finalidad la producción de una mezcla de ferrita y cementita que dé la combinación correcta de propiedades. La figura 12-3 muestra tres microconstituyentes importantes o arreglos atómicos de ferrita y cementita, que es lo que generalmente se desea obtener. La perlita es un microconstituyente formado por una mezcla laminar de ferrita y cementita. En la bainita, que se obtiene al transformar la austenita mediante un gran subenfriamiento, la cementita es más redonda que la perlita. La martensita revenida, que es una mezcla de cementita muy fina y casi esférica en la ferrita, se forma cuando se recalienta la martensita después de su formación.

Designaciones AISI (American Iron and Steel Institute) y SAE (Society of Automotive Engineers)[3] han organizado sistemas de designación (tabla 12-1) que utilizan un número

TABLA 12-1 ■ Composiciones de los aceros AISI-SAE

AISI-SAE Número	% C	% Mn	% Si	% Ni	% Cr	Otros
1020	0.18–0.23	0.30–0.60				
1040	0.37–0.44	0.60–0.90				
1060	0.55–0.65	0.60–0.90				
1080	0.75–0.88	0.60–0.90				
1095	0.90–1.03	0.30–0.50				
1140	0.37–0.44	0.70–1.00				0.08–0.13% S
4140	0.38–0.43	0.75–1.00	0.15–0.30		0.80–1.10	0.15–0.25% Mo
4340	0.38–0.43	0.60–0.80	0.15–0.30	1.65–2.00	0.70–0.90	0.20–0.300% Mo
4620	0.17–0.22	0.45–0.65	0.15–0.30	1.65–2.00		0.20–0.30% Mo
52100	0.98–1.10	0.25–0.45	0.15–0.30		1.30–1.60	
8620	0.18–0.23	0.70–0.90	0.15–0.30	0.40–0.70	0.40–0.60	0.15–0.25% Y
9260	0.56–0.64	0.75–1.00	1.80–2.20			

de cuatro o cinco dígitos. Los primeros dos dígitos se refieren a los principales elementos de aleación presentes, y los últimos dos o tres dígitos corresponden al porcentaje de carbono. El AISI 1040 es un acero al bajo carbono con 0.40% C. El SAE 10120 es un acero al bajo carbono con 1.20% C. El AISI 4340 es una aleación de acero con 0.40% C. Noté que la ASTM (American Society for Testing of Materials) utiliza un procedimiento distinto para clasificar los aceros. La ASTM tiene una lista de especificaciones que describe los aceros apropiados para distintas aplicaciones. El siguiente ejemplo ilustra el uso de los números AISI.

EJEMPLO 12-1 *Diseño de un método para determinar el número AISI*

Se ha determinado que una herramienta de acero no aleado, utilizada para el maquinado de rines de aluminio para automóvil, funciona correctamente, pero se han perdido los registros de compra y usted no conoce la composición del acero. La microestructura del acero es martensita revenida, y usted debe partir del supuesto de que, a partir de su estructura, no es posible estimar la composición del acero. Diseñe un tratamiento que ayude a determinar el contenido de carbono del acero.

SOLUCIÓN

Suponga que no tiene acceso a equipo que le permitiera un análisis directo de la composición química de la pieza. En vista de que toda la estructura del acero es martensita revenida muy fina, podemos llevar a cabo un tratamiento térmico sencillo para producir una estructura que se pueda analizar con mayor facilidad. Esto se puede realizar de dos maneras diferentes.

La primera es calentar el acero a una temperatura justo por debajo de la temperatura A_1 y mantenerlo así durante un tiempo largo. El acero se sobrerreviene y se forman grandes esferas de Fe_3C en una matriz de ferrita. A continuación, utilizando la ley de la palanca, estimamos la cantidad de ferrita y cementita y calculamos el contenido de carbono. Si al usar este método encontramos 16% de Fe_3C , el contenido de carbono es:

$$\% \text{Fe}_3\text{C} = \left[\frac{(x - 0.0218)}{(6.67 - 0.0218)} \right] \times 100 = 16 \quad \text{o} \quad x = 1.086\% \text{ C}$$

Sin embargo, un procedimiento mejor es calentar el acero por encima de A_{cm} para producir sólo austenita. Si entonces el acero es enfriado lentamente, se transforma en perlita y en un microconstituyente primario. Si, al hacer lo anterior, estimamos que la estructura contiene 95% de perlita y 5% de Fe_3C primario, entonces:

$$\% \text{Perlita} = \left[\frac{(6.67 - x)}{(6.67 - 0.77)} \right] \times 100 = 95 \quad \text{o} \quad x = 1.065\% \text{ C}$$

El contenido de carbono está dentro de un rango del 1.065 a 1.086%, lo cual corresponde a un acero 10110. En este procedimiento, hemos supuesto que los porcentajes de peso y volumen de los microconstituyentes son iguales, lo que en el caso de los aceros es aproximadamente cierto.

Clasificaciones Los aceros pueden clasificarse con base en su composición o según la forma en que han sido procesados. Los aceros al carbono contienen hasta ~2% C. Estos aceros también pueden contener otros elementos, como, por ejemplo, silicio (máximo 0.6%), cobre (hasta 0.6%) y manganeso (hasta 1.65%). Los aceros "descarburados" o libres de carbono contienen menos de 0.005% C. Los aceros ultra bajos en carbono contienen un máximo de 0.03% C; también contienen niveles muy reducidos de otros elementos, como el Si y el Mn. Los aceros bajo carbono contienen de 0.04 a 0.15% de carbono. Estos aceros bajo carbono se utilizan para fabricar carrocerías automotrices y cientos de otras aplicaciones. Los aceros dulces contienen de 0.15 a 0.3% de

tratamientos térmicos se utilizan para alcanzar uno de tres objetivos: 1) eliminar los efectos del trabajo en frío, 2) controlar el endurecimiento por dispersión o 3) mejorar la maquinabilidad.

Recocido de proceso o de eliminación del trabajo en frío El tratamiento térmico de recristalización, utilizado para eliminar el efecto del trabajo en frío en aceros con menos de aproximadamente 0.25% C, se conoce como **recocido de proceso**. Éste se efectúa de 80 °C a 170 °C por debajo de la temperatura A_1 . La meta del tratamiento de recocido de proceso en los aceros es la misma que el recocido de los vidrios inorgánicos, en el sentido de que lo principal es reducir o eliminar de manera significativa los esfuerzos residuales.

Recocido y normalizado, seguido por endurecimiento por dispersión Los aceros se pueden endurecer por dispersión al controlar el tamaño de la perlita. Inicialmente se calienta el acero para producir una austenita homogénea (FCC fase γ), paso conocido como **austenitización**. El **recocido**, es decir un recocido total, permite que el acero se enfríe lentamente en el horno, produciendo perlita gruesa. El **normalizado** permite un enfriamiento más rápido del acero, al aire, que produce perlita fina. La figura 12-5 muestra las propiedades comunes que se obtienen al recocer y normalizar aceros al carbono.

Para recocer, se efectúa el austenitizado de los aceros hipoeutectoides a alrededor de 30 °C por encima de A_3 , produciendo 100% γ . Sin embargo, la austenitización de un acero hipereutectoide se efectúa a aproximadamente 30 °C por encima del A_1 , produciendo austenita y Fe_3C . Este proceso impide la formación, en los bordes de grano, de una película, frágil y continua de Fe_3C que se presenta al enfriar lentamente desde la región 100% γ . En ambos casos, un enfriamiento lento en el horno y una perlita gruesa proporcionan una resistencia relativamente baja y buena ductilidad.

Para el normalizado se efectúa el austenitizado a aproximadamente 55 °C por encima de A_3 o A_{cm} ; el acero se retira entonces del horno y se deja enfriar al aire. Este enfriamiento más rápido produce perlita fina y proporciona una resistencia más elevada.

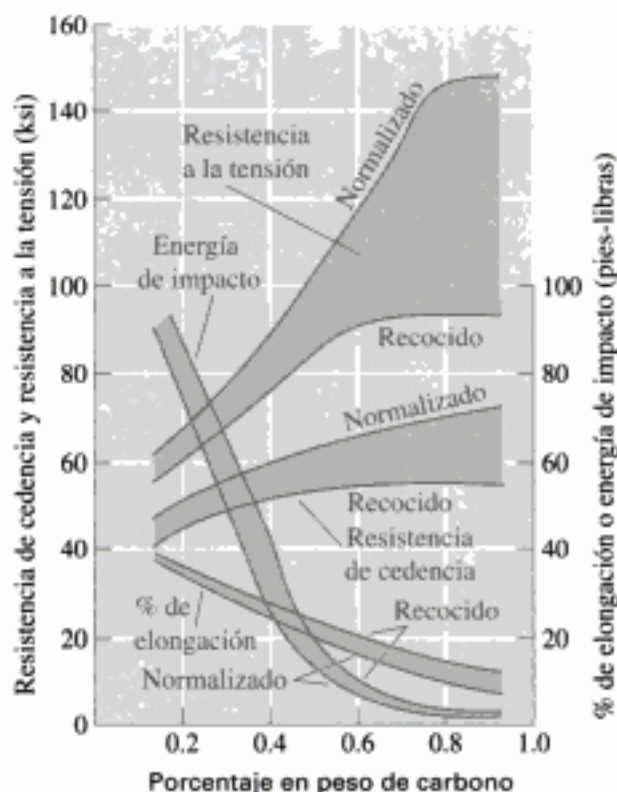


Figura 12-5
Efecto del carbono y del tratamiento térmico sobre las propiedades de los aceros al carbono.

Recocido de esferoidización y mejora en la maquinabilidad Los aceros alto carbono, con una gran concentración de Fe_3C , tienen características de maquinabilidad pobres. Mediante la *esferoidización*, es posible transformar la morfología del Fe_3C . Durante el recocido de esferoidización, que requiere varias horas a aproximadamente 30°C por debajo de A_1 , la morfología de la fase Fe_3C se transforma a grandes partículas esféricas, esferoides, con el objeto de reducir la superficie de la cementita en forma laminar. La microestructura, conocida como **esferoidita**, tiene una matriz continua de ferrita blanda y maquinable (Fig. 12-6). Para obtener las propiedades requeridas, se le da al acero, después de maquinado, un tratamiento térmico más sofisticado. Una estructura como la descrita se presenta cuando la martensita es revenida justo por debajo de A_1 , durante un largo periodo. Como ya se hizo notar, también se agregan elementos de aleación como el Pb y S y, más recientemente, se han desarrollado "aceros verdes" libres de plomo que alcanzan una muy buena maquinabilidad.[5,6]

El siguiente ejemplo muestra la forma en que se pueden desarrollar diferentes especificaciones de tratamiento térmico para un acero de una composición dada.

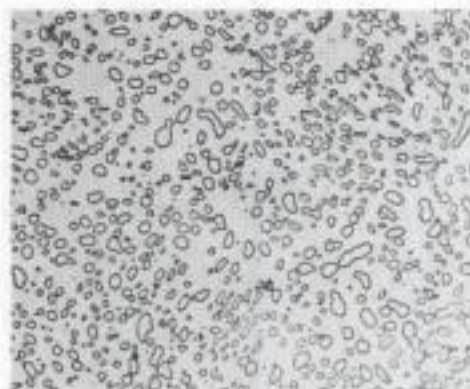


Figura 12-6
Microestructura de la esferoidita, con partículas de Fe_3C en una matriz de ferrita (850 $\times$). (De ASM Handbook, vol. 7, (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073).

EJEMPLO 12-2 Determinación de las temperaturas del tratamiento térmico

Recomiende temperaturas para el recocido de proceso, el recocido total, el normalizado y el recocido de esferoidización, para los aceros 1020, 1077 y 10120.

SOLUCIÓN

De la figura 12-2 determinamos las temperaturas críticas A_1 , A_3 o A_{cm} para cada uno de los aceros. Podemos, entonces, con base en estas temperaturas, definir el tratamiento térmico.

Tipo de acero	1020	1077	10120
Temperaturas críticas	$A_1 = 727^\circ\text{C}$ $A_3 = 830^\circ\text{C}$	$A_1 = 727^\circ\text{C}$	$A_1 = 727^\circ\text{C}$ $A_{cm} = 895^\circ\text{C}$
Recocido de proceso	$727 - (80 \text{ a } 170)$ $= 557^\circ\text{C a } 647^\circ\text{C}$	Sin hacer	Sin hacer
Recocido total	$830 + 30 = 860^\circ\text{C}$	$727 + 30 = 757^\circ\text{C}$	$727 + 30 = 757^\circ\text{C}$
Normalizado	$830 + 55 = 885^\circ\text{C}$	$727 + 55 = 782^\circ\text{C}$	$895 + 55 = 950^\circ\text{C}$
Recocido de esferoidizado	Sin hacer	$727 - 30 = 697^\circ\text{C}$	$727 - 30 = 697^\circ\text{C}$

12-3 Tratamientos térmicos isotérmicos

En el capítulo 11 fue analizado el efecto de la temperatura de transformación sobre las propiedades de un acero 1080 (eutectoide). Conforme baja la temperatura isotérmica de transformación, la perlita se vuelve progresivamente más fina, antes de que empiece a formarse la bainita. A temperaturas muy bajas, se obtiene martensita.

Bainitizado y recocido isotérmico El tratamiento térmico de transformación isotérmico utilizado para producir la bainita, conocido como **bainitizado** o **austemplado**, simplemente comprende la austenitización del acero, el templeado a cierta temperatura por debajo de la nariz de la curva TTT, o de transformación isotérmica, y el mantenimiento a dicha temperatura hasta que toda la austenita se haya convertido en bainita (Fig. 12-7).

Por lo general, el recocido y el normalizado se utilizan para controlar la finura de la perlita. Sin embargo, la perlita formada a partir de un **recocido isotérmico** (Fig. 12-7) puede tener propiedades más uniformes, ya que las velocidades de enfriamiento y la microestructura obtenida durante el recocido y normalizado varían a lo largo de la sección transversal del acero. *Notése que los diagramas TTT solo describen tratamientos térmicos isotérmicos (por ejemplo, supongamos que la muestra empieza y termina el tratamiento térmico a una temperatura dada).* Por tanto, no podemos describir con exactitud los tratamientos térmicos superponiendo curvas de enfriamiento sobre un diagrama TTT, como los mostrados en la figura 12-7 (sección 12-4).

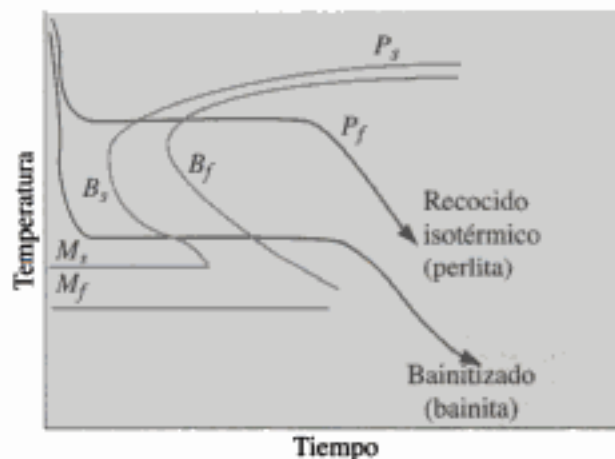


Figura 12-7
Tratamientos térmicos de bainitizado y de recocido isotérmico en un acero 1080.

Efecto de los cambios en la concentración de carbono sobre el diagrama TTT Tanto en un acero hipoeutectoide como en uno hipereutectoide, el diagrama TTT debe reflejar la posible formación de una fase primaria. En la figura 12-8 se muestran los diagramas de transformación isotérmica para los aceros 1050 y 10110. El cambio más notable es la presencia de un “ala” que se inicia en la nariz de la curva y se vuelve asintótica con la temperatura A_3 o con la temperatura A_{cm} . Dicha ala representa el inicio de la ferrita (F_p) en los aceros hipoeutectoides o el inicio de la cementita (C_p) en los aceros hipereutectoides.

Cuando se austenitiza, templea y mantiene entre las temperaturas A_1 y A_3 a un acero 1050, se nuclea y crece ferrita primaria o proeutectoide. Finalmente, se llegará a un equilibrio en las cantidades de ferrita y de austenita. De manera similar, en un acero 10110 mantenido entre las temperaturas A_{cm} y A_1 se nuclea y crece la cementita primaria o proeutectoide hasta su punto de equilibrio.

Si un acero 1050 austenitizado se templea a una temperatura entre las temperaturas de la nariz y A_1 , de nuevo la ferrita primaria se nuclea y crece hasta alcanzar el valor de equilibrio. El resto de la austenita entonces se convierte en perlita. Una situación similar, pero que produce cementita primaria y perlita, ocurre en un acero hipereutectoide.

Un procedimiento más adecuado sería utilizar un tratamiento térmico isotérmico. Partiendo de la figura 12-8, encontramos que podemos obtener una dureza HRC 23 transformando a 600 °C la austenita en una mezcla de ferrita y cementita. De la figura 12-2, determinamos que la temperatura A_1 es de 770 °C. Por tanto, nuestro tratamiento térmico es:

1. Austenitice el acero a $770 + (30 \text{ a } 55) = 805 \text{ °C}$ a 825 °C, manteniéndolo así durante una hora y obteniendo 100% γ .

2. Temple a 600 °C y consérvelo a esa temperatura durante al menos 10 segundos. Después de aproximadamente 1.0 segundos la ferrita primaria empieza a precipitarse de la austenita inestable. Después de 1.5 segundos empieza a crecer la perlita, y después de aproximadamente 10 segundos la austenita se ha transformado totalmente en ferrita y perlita. Después de este tratamiento, los microconstituyentes presentes son:

$$\alpha \text{ primaria} = \left[\frac{(0.77 - 0.5)}{(0.77 - 0.0218)} \right] \times 100 = 36\%$$

$$\text{Perlita} = \left[\frac{(0.5 - 0.0218)}{(0.77 - 0.0218)} \right] \times 100 = 64\%$$

3. Enfríe al aire a la temperatura ambiente, conservando el equilibrio entre la ferrita y la perlita primarias. La microestructura y la dureza resultan uniformes gracias al recocido isotérmico.

Interrupción de la transformación isotérmica Si se interrumpe el tratamiento térmico isotérmico, se producen microestructuras complicadas. Por ejemplo, podríamos austenitizar el acero 1050 (Fig. 12-9) a 800 °C, templarlo a 650 °C y conservarlo a esa temperatura durante por lo menos 10 segundos (permitiendo la formación de algo de ferrita y de perlita) y, a continuación, templarlo a 350 °C y conservarlo así durante una hora (3600 segundos). Cualquier austenita inestable remanente después de templar a 350 °C se transformará en bainita. La estructura final está constituida por ferrita, perlita y bainita. Podríamos complicar aún más el tratamiento interrumpiéndolo a 350 °C después de un minuto (60 segundos) y finalmente templando. Cualquier austenita remanente después de un minuto a 350 °C formará martensita. Ahora la estructura final está constituida por ferrita, perlita, bainita y martensita. ¡Obsérvese que

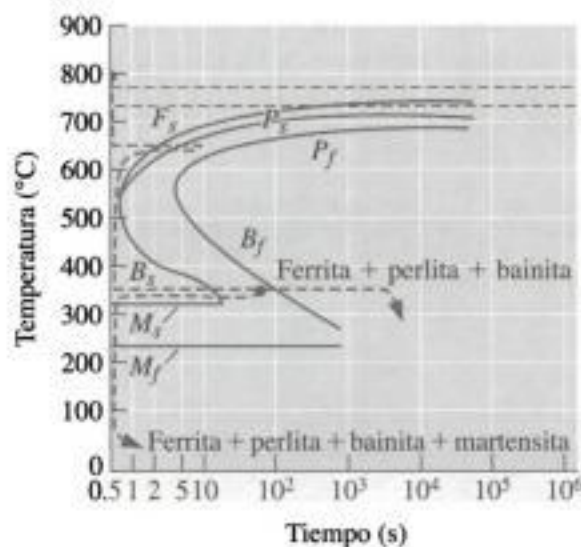


Figura 12-9
Al interrumpir el tratamiento térmico isotérmico en un acero 1050, se producen microestructuras complicadas.

revenimos. Durante el revenido, se forma una mezcla íntima de ferrita y cementita a partir de la martensita, como se vio en el capítulo 11. El tratamiento de revenido controla las propiedades finales del acero (Fig. 12-11 de la página 555). Obsérvese que esto es distinto de un tratamiento de recocido de esferoidización (Fig. 12-6). El siguiente ejemplo ilustra cómo puede utilizarse una combinación de tratamientos térmicos para obtener aceros con las propiedades que se deseen.

EJEMPLO 12-4 *Diseño de un tratamiento de templeado y revenido*

Una flecha giratoria que transmite la energía de un motor eléctrico está fabricada de un acero 1050. Su resistencia de cedencia debe ser por lo menos de 145 000 psi, y además debe tener al menos un 15 % de elongación, a fin de que sea tenaz. Diseñe un tratamiento térmico para producir esta pieza.

SOLUCIÓN

Con un recocido o normalizado no es posible obtener esta combinación de propiedades (Fig. 12-5). Sin embargo, un tratamiento térmico de templeado y revenido produce una microestructura que puede dar a la vez resistencia y tenacidad. La figura 12-11 muestra que la resistencia de cedencia excederá los 145 000 psi si se reviene el acero por debajo de 460 °C, en tanto que la elongación excederá el 15% si se efectúa el revenido por encima de 425 °C. La temperatura A_1 del acero es de 770 °C. Un posible tratamiento térmico sería:

1. Austenitice el acero por encima de la temperatura A_1 de 770 °C durante una hora. Una temperatura apropiada podría ser $770 + 55 = 825$ °C.
2. Temple rápidamente a temperatura ambiente. Dado que el M_s es aproximadamente de 250 °C, se formará martensita.
3. Haga un revenido del acero, calentando a 440 °C. Normalmente, será suficiente una hora de revenido si la pieza de acero no es muy gruesa.
4. Enfríe a la temperatura ambiente.

Austenita retenida Cuando se forma martensita a partir de la austenita ocurre una gran expansión volumétrica. Durante el templeado se van formando placas de martensita, que rodean y separan pequeñas isletas de austenita (Fig. 12-12), las cuales se deforman para acomodar la martensita de menor densidad. Sin embargo, para que puedan transformarse las isletas remanentes de austenita, la martensita circundante deberá deformarse. Dado que la martensita es fuerte y se resiste a la transformación, la martensita existente se agrieta o, si no, la austenita queda atrapada en la estructura formando **austenita retenida**. La austenita retenida puede resultar un problema serio. Con el revenido, la martensita se ablanda y se hace más dúctil. Después del revenido, la austenita retenida se enfría por debajo de las temperaturas M_s y



Figura 12-12

Austenita retenida (blanco) atrapada entre la martensita (negro) (1000 x). (Tomado de ASM Handbook, vol. 8, (1973), ASM International, Materials Park, OH 44073.)

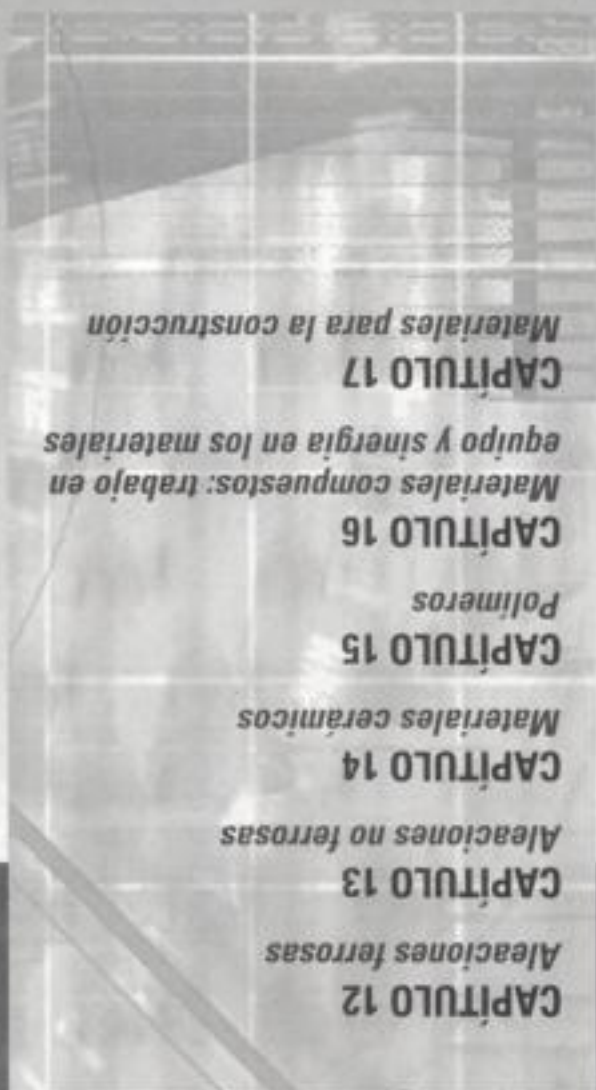
Los materiales compuestos son aún más difíciles de clasificar, debido a los muchos tipos existentes y en razón de su pretendido uso, como se hace notar en el capítulo 16. Muchos compuestos están diseñados para proporcionar características especiales que exceden los métodos convencionales para controlar la relación estructura-propiedad. Materiales para la construcción, como la madera y el concreto, descritos en el capítulo 17, son tipos especiales de materiales "compuestos".

Frecuentemente encontramos componentes y estructuras compuestas hechas a partir de varios o incluso de todos estos grupos. Cada uno de estos grupos tiene su propio conjunto de propiedades que se adecuan mejor a la aplicación de que se trate.

Las propiedades mecánicas de los materiales pueden predecirse y controlarse al comprender el enlace atómico, el arreglo atómico y los mecanismos de endurecimiento analizados en las secciones anteriores. Este hecho es particularmente evidente en los capítulos 12 y 13, en los cuales las ideas de endurecimiento por solución sólida, endurecimiento por deformación y endurecimiento por dispersión son aplicadas a las aleaciones ferrosas y no ferrosas. El análisis de los materiales cerámicos y de los polímeros de los capítulos 14 y 15 destaca la importancia de la unión atómica y del arreglo atómico correspondiente. Las propiedades mecánicas de los materiales cerámicos y de los polímeros se explican en dichos capítulos mediante mecanismos que no involucran el movimiento de dislocaciones.

Materiales de ingeniería

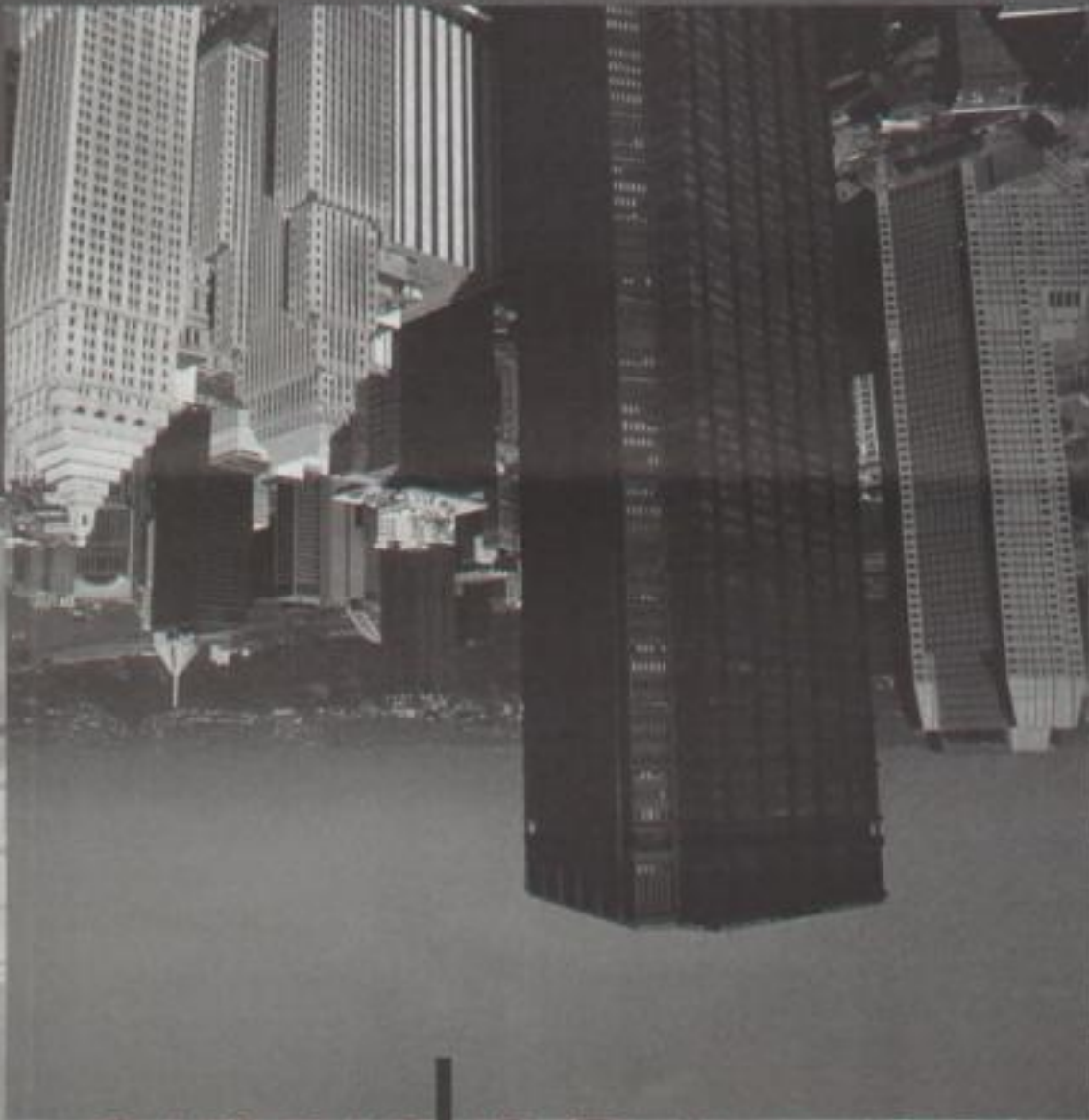
PART 3



—Rudyard Kipling
(*Epithets of Power*, Disc/Getty Images.)

Oro es para el ama; plata, para la doncella;
cobre para el artesano, habil en su oficio.
"¡Bien!" —dijo el Barón, sentado en su barda,
"¡pero el hierro —el frío hierro— es quien manda a todos ellos!"

Los aceros constituyen la familia de materiales de mayor uso para aplicaciones estructurales y de carga. La mayoría de los edificios, puentes, herramientas, automóviles y otras numerosas aplicaciones utilizan aleaciones ferrosas. Gracias a una amplia variedad de tratamientos térmicos que proporcionan una gran diversidad de microestructuras y de propiedades, los aceros son posiblemente la familia más versátil de entre los materiales de ingeniería.



Capítulo

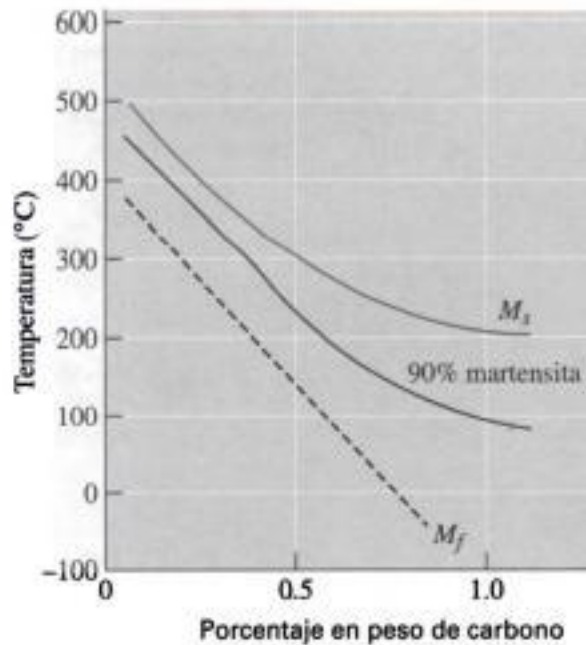


Figura 12-13
Al incrementarse el carbono en los aceros al carbono se reducen las temperaturas M_s y M_f .

M_f y se transforma en martensita, ya que la **martensita revenida** circundante sí puede deformarse. ¡Pero ahora el acero tiene un contenido mayor de martensita dura y frágil! Es posible que resulte necesario un segundo paso de revenido a fin de eliminar la martensita que se formó a partir de la austenita retenida. Ésta también resulta un problema para los aceros al alto carbono. Las temperaturas de inicio y de terminación de la martensita disminuyen al aumentar el contenido de carbono (Fig. 12-13). Los aceros al alto carbono deben refrigerarse a fin de poder producir solo martensita.

Esfuerzos residuales y agrietamiento Con el cambio de volumen o con el trabajo en frío también se generan esfuerzos residuales. Se puede efectuar un recocido para eliminar o minimizar los esfuerzos residuales debidos al trabajo en frío. Los esfuerzos también se generan a causa de la dilatación y la contracción térmicas. En los aceros se presenta un mecanismo adicional que causa esfuerzos. Cuando los aceros se templen, la superficie del acero templado

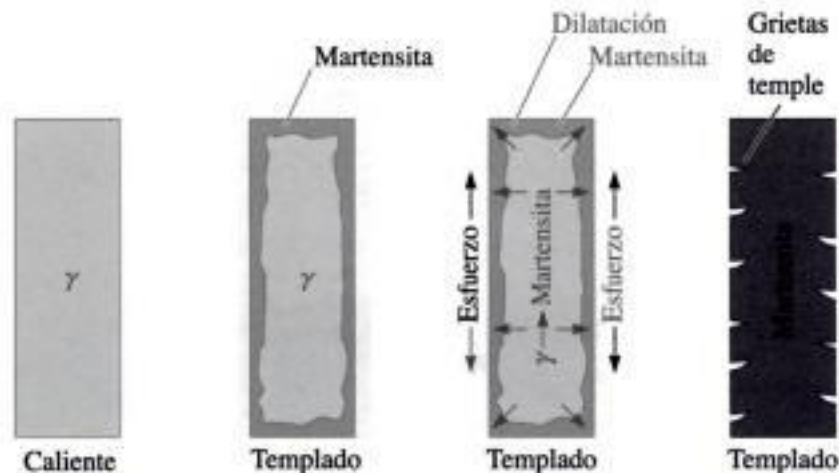


Figura 12-14 Formación de grietas de temple causadas por esfuerzos residuales producidos durante este tratamiento. La figura ilustra el desarrollo de esfuerzos, al transformarse la austenita en martensita durante el enfriamiento.

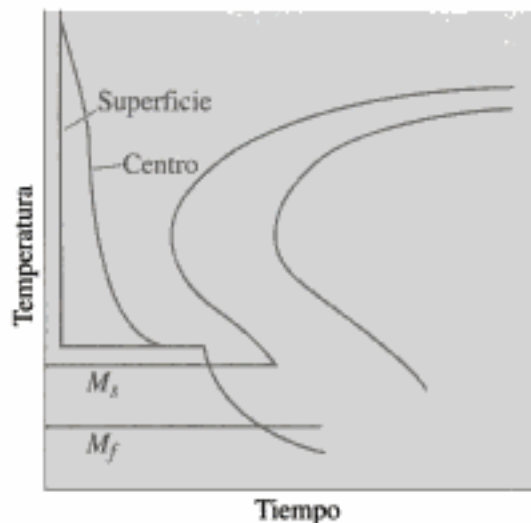


Figura 12-15

Tratamiento térmico de temple interrumpido o martemplado, diseñado para reducir los esfuerzos residuales y las grietas por temple.

se enfría rápidamente, transformándose en martensita. Cuando posteriormente la austenita en el centro se transforma, la superficie dura queda sometida a la tensión, en tanto que el centro queda comprimido. Si los esfuerzos residuales exceden la resistencia de cedencia, en la superficie se forman **grietas de temple** (Fig. 12-14). Sin embargo, si se enfría primero justo por encima de M_s y se mantiene ahí hasta que en todo el volumen la temperatura sea igual, un templeado subsecuente permitirá que todo el acero se transforme en martensita casi simultáneamente. Este tratamiento térmico se llama **temple interrumpido** o **martemplado** (Fig. 12-15). Obsérvese que, hablando estrictamente como se verá más adelante, para examinar los tratamientos térmicos no isotérmicos deberán usarse los diagramas TEC.

Velocidad del templeado En la utilización del diagrama TTT, supusimos que era posible enfriar de manera instantánea desde la temperatura de austenitizado hasta la temperatura de transformación. Dado que en la práctica esto no ocurre, durante el proceso de templeado pueden formarse microconstituyentes no deseables. Por ejemplo, se puede formar perlita al enfriarse el acero más allá de la nariz de la curva, especialmente si el tiempo de la nariz es inferior a un segundo, en el caso de aceros al carbono.

La velocidad a la cual se enfría el acero durante el templeado depende de varios factores. Primero, la superficie de una pieza siempre se enfría más rápido que el centro. Además, conforme el tamaño de la pieza es mayor, menor es la rapidez con que cualquiera de sus partes se enfría. Finalmente, la velocidad de enfriamiento depende de las características de transferencia

TABLA 12-2 ■ Coeficiente H , es decir severidad del templeado, para diversos medios

Medio	Coeficiente H	Velocidad de enfriamiento en el centro de una barra de una pulgada ($^{\circ}\text{C/s}$)
Aceite (sin agitar)	0.25	18
Aceite (agitado)	1.0	45
H_2O (sin agitar)	1.0	45
H_2O (agitado)	4.0	190
Salmuera (sin agitar)	2.0	90
Salmuera (agitada)	5.0	230

Si enfriamos un acero 1080 a una velocidad de 5°C/s , el diagrama TEC nos indica que obtendremos perlita gruesa; el acero ha sido recocido. Si enfriamos a 35°C/s , obtenemos perlita fina y se trata de un tratamiento térmico de normalizado. Si enfriamos a 100°C/s , se permite el inicio de la formación de la perlita, pero la reacción es incompleta y la austenita remanente se convierte en martensita. Obtendremos un 100% de martensita, pudiendo así efectuar un templeado y un tratamiento térmico de templeado, solo si enfriamos más rápido que 140°C/s . Otros aceros, como el de bajo carbono de la figura 12-17, tienen diagramas TEC más complicados. En varias fuentes bibliográficas podrá encontrar una compilación de diagramas TTT y TEC para diferentes grados de acero.

12-5 Efecto de los elementos de aleación

Los elementos de aleación se agregan a los aceros con la finalidad de a) proporcionar un endurecimiento en solución sólida de la ferrita, b) causar la precipitación de carburos de aleación en vez de Fe_3C , c) mejorar la resistencia a la corrosión y otras características especiales del acero y d) mejorar la **templabilidad** o **capacidad de endurecimiento**. El término *templabilidad* describe la facilidad con la cual los aceros pueden formar martensita. Esto se relaciona con la facilidad con que podemos formar martensita en una sección gruesa de acero que se está templando. Con un acero más templable nos podemos "arreglar" con una velocidad de enfriamiento relativamente lenta y aun así obtener martensita. La mejora en la capacidad de endurecimiento es de máxima importancia en los aceros aleados y para herramientas.

Capacidad de endurecimiento (templabilidad) En aceros al carbono, la nariz de las curvas TTT y TEC se presenta en tiempos muy breves; por lo tanto, se requieren velocidades muy elevadas de enfriamiento para producir solo martensita. En secciones delgadas de acero, el templeado rápido produce distorsión y grietas. En los aceros gruesos no llegamos a producir solo martensita. Todos los elementos comunes de aleación en el acero desplazan los diagramas TTT y TEC a tiempos más prolongados, lo cual nos permite obtener pura martensita incluso en secciones gruesas a velocidades de enfriamiento lentas. La figura 12-18 muestra las curvas TTT y TEC para un acero 4340.

Los aceros al carbono tienen baja templabilidad; es decir, solo velocidades de enfriamiento muy elevadas transforman todo en martensita. Los aceros aleados tienen una templabilidad elevada; incluso el enfriamiento al aire puede producir martensita. La templabilidad no se refiere a la dureza del acero. Un acero bajo carbono y alta aleación puede formar fácilmente martensita; pero, en razón de su bajo contenido de carbono, la martensita no será dura.

Efecto en la estabilidad del diagrama de fases Cuando se añaden al acero elementos de aleación, se afecta la estabilidad del sistema binario $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$ y se altera el diagrama de fases (Fig. 12-19). Los elementos de aleación reducen el contenido de carbono al cual ocurre la reacción eutectoide y modifican las temperaturas A_1 , A_3 y A_{cm} . Un acero que solo contenga 0.6% C es hipoeutectoide y funcionaría a 700°C sin formar austenita; un acero igual pero con 6% Mn es hipereutectoide y a 700°C forma austenita.

Forma del diagrama TTT Los elementos de aleación pueden producir en el diagrama TTT una región en forma de "ensenada", como ocurre con el acero 4340 (Fig. 12-18). Esta región de ensenada se utiliza como base para un tratamiento termomecánico conocido como **ausformado**. Un acero puede ser austenitizado, templado hasta la región de ensenada, deformado plásticamente y finalmente templado para producir martensita (Fig. 12-20). Los aceros que se sujetan a este tratamiento se conocen como *aceros ausformados*.

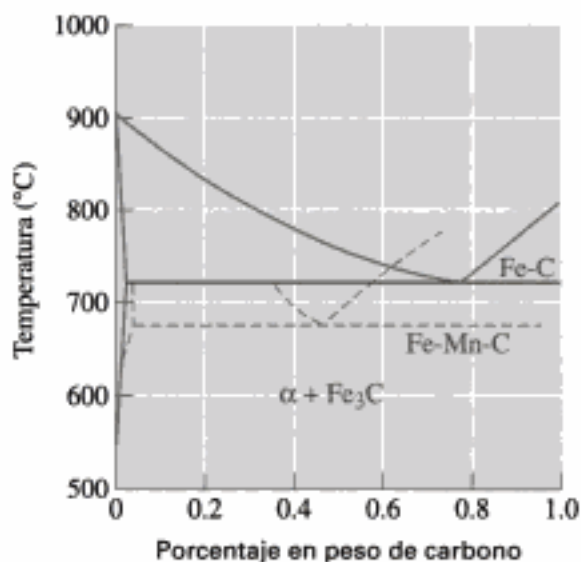


Figura 12-19
Efecto de un 6% de manganeso sobre los rangos de estabilidad de las fases en la porción eutéctica del diagrama de fases Fe-Fe₃C.

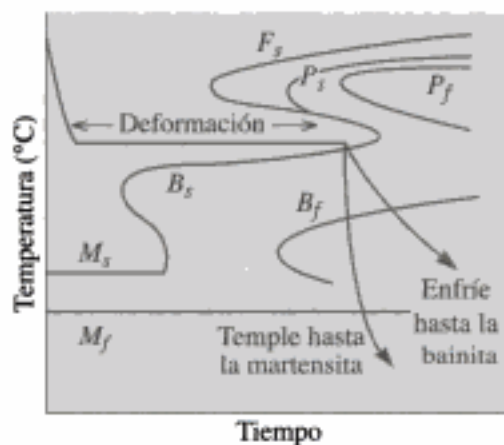


Figura 12-20
Cuando los elementos de aleación forman una región en ensenada en el diagrama TTT, se puede ausformar el acero.

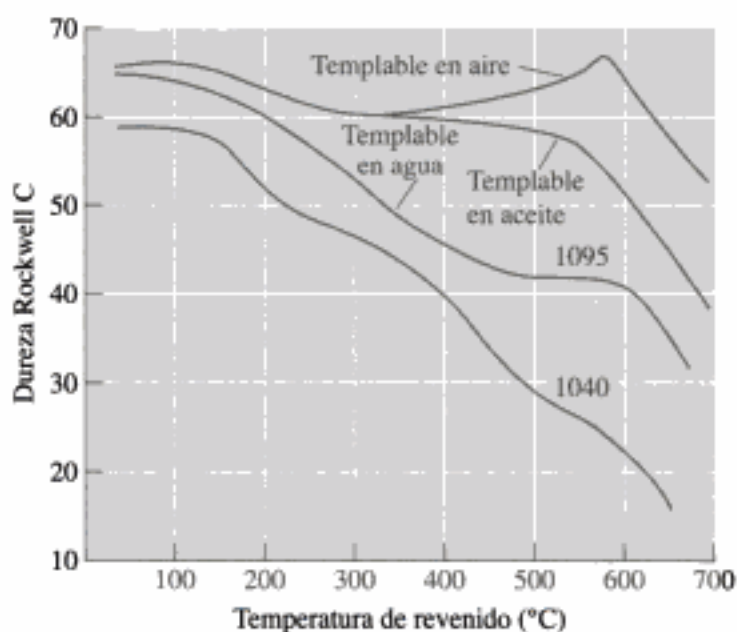


Figura 12-21
Efecto de los elementos de aleación sobre las fases formadas durante el revenido de los aceros. El acero templable al aire muestra un pico secundario de endurecimiento.

frágil.

que el microconstituyente eutectoide sea dúctil o los sistemas metálicos, comente sobre si se espera yente eutectoide para los siguientes sistemas. Para cantidad de cada fase presente en el microconstitución de cada fase en la reacción eutectoide y la posición de cada fase en la reacción eutectoide, la com-

11-62 Determine la temperatura del eutectoide, la com-

en el acero.

time la temperatura y el contenido total de carbono

11-61 Un acero es calentado hasta que se forma 85% de

en el acero.

time la temperatura y el contenido total de carbono

11-60 Un acero es calentado hasta que se forma 40% de

Estime el contenido de carbono en el acero.

11-59 Un acero contiene 96% de γ y 4% de Fe_3C a 800 °C.

Estime el contenido de carbono en el acero.

11-58 Un acero contiene 55% de α y 45% de γ a 750 °C.

Estime el contenido de carbono en el acero.

11-57 Un acero contiene 94% de perlita y 6% de cementita

primaria a la temperatura ambiente. Estime el conte-

11-56 Un acero contiene 18% de perlita y 82% de ferrita

peritectoide?

carbono en el acero. ¿Es el acero hipoeutectoide o hi-

11-55 Un acero contiene 18% de cementita y 82% de ferrita

a la temperatura ambiente. Estime el contenido de

11-54 Un acero contiene 8% de cementita y 92% de ferrita

a la temperatura ambiente. Estime el contenido de

carbono en el acero. ¿Es el acero hipoeutectoide o hi-

11-53 Para una aleación Fe-1.15% C, determine

a) la temperatura a la cual empieza a transformarse

la austenita al reducirse la temperatura.

b) el primer microconstituyente que se forma.

c) la composición y cantidades de cada una de las

fases presentes a 728 °C.

d) la composición y cantidades de cada una de las

fases presentes a 726 °C y

e) la composición y cantidades de cada microcons-

tituyente presente a 726 °C.

11-53 Para una aleación Fe-1.15% C, determine

a) la temperatura a la cual empieza a transformarse

la austenita al reducirse la temperatura.

b) el primer microconstituyente que se forma.

c) la composición y cantidades de cada una de las

fases presentes a 728 °C.

d) la composición y cantidades de cada una de las

fases presentes a 726 °C y

e) la composición y cantidades de cada microcons-

11-68 En el diagrama TTT, ¿cuál es la diferencia entre las

no con 0.77% de carbono.

11-67 Esboce y marque con claridad las diferentes regiones

de un diagrama TTT para un acero simple al carbono.

11-66 ¿Qué es un diagrama TTT?

11-65 ¿Por qué razón un acero eutectoide exhibe diferente

resistencia de cedencia y % de alargamiento, depen-

diendo de si fue enfriado lento o relativamente rápido?

a) 700 °C y

b) 600 °C.

11-64 Compare el espaciamiento interlaminar y el esfuerzo

de fluencia cuando se transforma un acero eutectoide

isotérmicamente en perlita a

11-63 ¿Por qué en una reacción eutectoide las distancias in-

terlaminares son típicamente menores que las forma-

das en las reacciones eutécticas?

11-62 Determine la temperatura del eutectoide, la com-

en el acero.

time la temperatura y el contenido total de carbono

11-61 Un acero es calentado hasta que se forma 85% de

en el acero.

time la temperatura y el contenido total de carbono

11-60 Un acero es calentado hasta que se forma 40% de

Estime el contenido de carbono en el acero.

11-59 Un acero contiene 96% de γ y 4% de Fe_3C a 800 °C.

Estime el contenido de carbono en el acero.

11-58 Un acero contiene 55% de α y 45% de γ a 750 °C.

Estime el contenido de carbono en el acero.

11-57 Un acero contiene 94% de perlita y 6% de cementita

primaria a la temperatura ambiente. Estime el conte-

11-56 Un acero contiene 18% de perlita y 82% de ferrita

peritectoide?

carbono en el acero. ¿Es el acero hipoeutectoide o hi-

11-55 Un acero contiene 18% de cementita y 82% de ferrita

a la temperatura ambiente. Estime el contenido de

11-54 Un acero contiene 8% de cementita y 92% de ferrita

a la temperatura ambiente. Estime el contenido de

carbono en el acero. ¿Es el acero hipoeutectoide o hi-

11-53 Para una aleación Fe-1.15% C, determine

a) la temperatura a la cual empieza a transformarse

la austenita al reducirse la temperatura.

b) el primer microconstituyente que se forma.

c) la composición y cantidades de cada una de las

fases presentes a 728 °C.

d) la composición y cantidades de cada una de las

fases presentes a 726 °C y

e) la composición y cantidades de cada microcons-

11-49 ¿Qué significan los términos aceros "hipoeutectoide" e "hipereutectoide"?

11-50 ¿Cuál es la diferencia entre un microconstituyente y una fase?

11-51 La figura 11-1 muestra la curva sigmoidea para la transformación de la austenita. Determine las constantes c y n de la ecuación 11-2 para esta reacción. Comparando esta figura con el diagrama TTT (Figura 11-21), estime la temperatura a la cual ocurrió esta transformación.

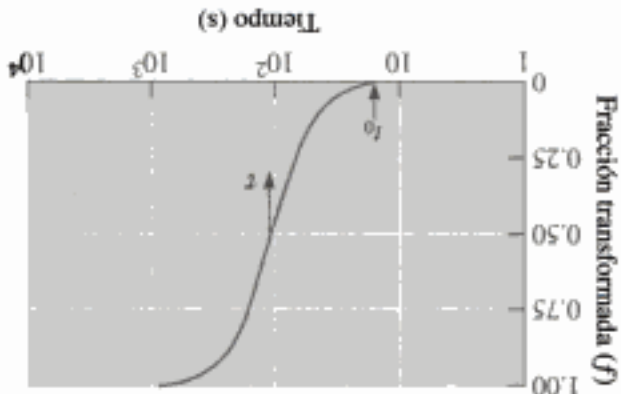


Figura 11-1 (Repetida para el problema 11-51). Curva sigmoidea que muestra la velocidad de transformación del hierro FCC a una temperatura constante. También se muestra el tiempo de incubación t_0 y el tiempo t para la transformación de 50%.

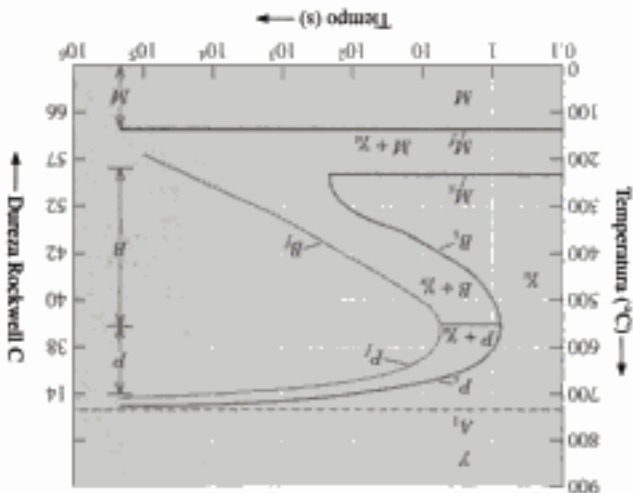
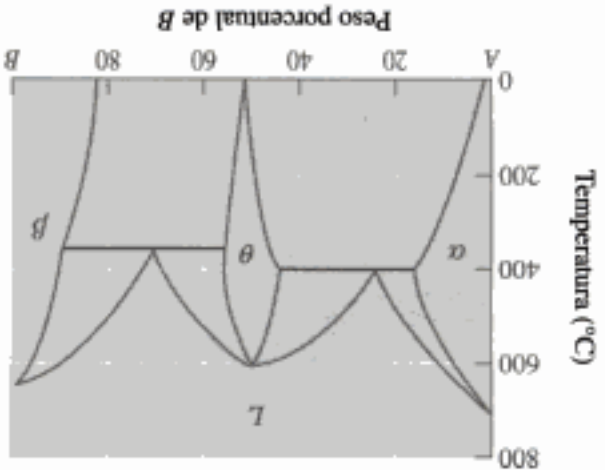


Figura 11-21 (Repetida para el problema 11-51). Diagrama de transformación tiempo-temperatura (TTT) para un acero eutectoide.

11-52 Para una aleación Fe-0.35% C, determine

a) La temperatura a la cual empieza a transformarse la austenita al reducirse la temperatura,

Figura 11-32 Diagrama de fases hipotético (para el problema 11-38).



a) A-10% B (b) A-20% B (c) A-55% B
d) A-87% B (e) A-95% B

Sección 11-8 Uso de aleaciones endurecibles por envejecimiento a altas temperaturas

11-39 ¿Cuál es la limitación principal en el uso de aleaciones endurecidas por precipitación? Pueden los materiales endurecidos por dispersión como el níquel TD (capítulo 16) utilizarse a temperaturas elevadas?

11-40 ¿Cómo es que ciertas aleaciones de aluminio (no las basadas en níquel) pueden perder su resistencia durante la soldadura?

11-41 Para la fabricación de un bat de béisbol de aleación de aluminio, ¿seleccionaría una aleación endurecida por precipitación?

11-42 ¿Qué tipo de aleaciones endurecidas por dispersión pueden conservar su resistencia hasta ~1000 °C?

Sección 11-9 La reacción eutectoide

11-43 Escriba la reacción eutectoide en el sistema Fe-Fe₃C.

11-44 Esboce la microestructura de la perlita formada gradualmente a un enfriamiento lento de un acero con una composición eutectoide.

11-45 Compare y contraste las reacciones eutéctica y eutectoide.

11-46 ¿Cuáles son las solubibilidades del carbono las formas α , δ y del hierro?

11-47 Defina los términos siguientes: ferrita, austenita, perlita y cementita.

11-48 La microestructura de perlita es similar a un nanocompuesto metacelámico. Verdadero o falso.

Comente.

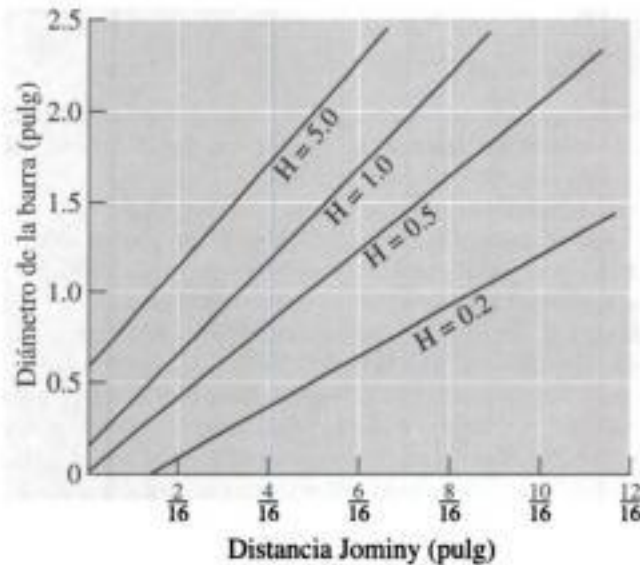


Figura 12-24
Gráfica de Grossman, que se utiliza para determinar la templabilidad en el centro de una barra de acero para diferentes medios de temple.

En otra técnica simple, se utiliza la severidad de temple y la gráfica de Grossman (Fig. 12-24) para determinar la dureza en el *centro* de una barra redonda. El diámetro de la barra y el coeficiente H, es decir, la severidad del temple que aparece en la tabla 12-2, nos dan la distancia Jominy en el centro de la barra. A partir de ahí se puede determinar la dureza en función de la curva de templabilidad del acero (véase el ejemplo 12-6).

EJEMPLO 12-6 *Diseño de un proceso de templeado*

Diseñe un proceso de templeado para producir una dureza mínima de HRC 40 en el centro de una barra de acero 4320 de 1.5 pulg de diámetro.

SOLUCIÓN

En la tabla 12-2 aparecen varios medios de temple. Podemos encontrar un coeficiente H apropiado para cada uno de ellos, y a continuación utilizar la figura 12-24 para estimar la distancia Jominy en una barra de diámetro de 1.5 pulg para cada uno de los medios. Finalmente, podremos utilizar la curva de templabilidad (Fig. 12-23) para determinar la dureza del acero 4320. Los resultados aparecen en la siguiente lista.

	Coefficiente H	Distancia Jominy	HRC
Aceite (sin agitar)	0.25	11/16	30
Aceite (agitado)	1.00	6/16	39
H ₂ O (sin agitar)	1.00	6/16	39
H ₂ O (agitado)	4.00	4/16	44
Salmuera (sin agitar)	2.00	5/16	42
Salmuera (agitada)	5.00	3/16	46

Los tres últimos métodos, basados en salmuera o agua agitada, son satisfactorios. El uso de salmuera sin agitar como medio de temple podría ser el más económico, ya que no se requiere de equipo adicional para agitar el baño de templeado. Por otra parte, el H₂O es menos corrosivo que la salmuera.

12-7

Aceros especiales

Existen muchas clases especiales de aceros, incluyendo aceros para herramienta, aceros libres de intersticios, aceros de alta resistencia y baja aleación (*HSLA* por sus siglas en inglés), aceros bifásicos y aceros martensíticos envejecibles.

Los **aceros para herramienta** son por lo común aceros al alto carbono que alcanzan una elevada dureza mediante un tratamiento térmico de templado y revenido. Entre sus aplicaciones se incluyen las herramientas de corte en operaciones de maquinado, los dados para la fundición a presión, los dados para conformado mecánico y otros usos en los cuales se requiere una combinación de elevada resistencia, dureza, tenacidad y resistencia a la temperatura.

Los elementos de aleación mejoran la templabilidad y la estabilidad a elevadas temperaturas de los aceros para herramienta. Los aceros endurecibles al agua, como el 1095, deben ser templados con rapidez para producir martensita y también ablandan rápidamente incluso a temperaturas relativamente bajas. Los aceros endurecibles al aceite forman martensita con mayor facilidad, se revienen más lentamente, pero, aun así, se ablandan a temperaturas elevadas. Los aceros endurecibles al aire y los especiales para herramienta pueden endurecerse por transformación de martensita al enfriarse al aire. Además, estos aceros no se ablandan hasta no llegar cerca de la temperatura A_1 . De hecho, los aceros para herramienta de alta aleación pueden presentar un **pico de endurecimiento secundario** cerca de los 500°C al disolverse la cementita y precipitarse carburos aleados duros. (Fig. 12-21) Los carburos aleados son particularmente estables, resisten tanto el crecimiento como la esferoidización y son importantes para proveer resistencia a altas temperaturas de dichos aceros.

Los aceros de baja aleación y alta resistencia (*HSLA*) son aceros bajo carbono que contienen pequeñas cantidades de elementos de aleación. Los aceros *HSLA* se especifican en función de su resistencia a la cedencia, con grados de hasta 80 000 psi; los aceros contienen el mínimo de elementos de aleación que cause la resistencia a la cedencia adecuada sin tratamiento térmico. En estos aceros, un procesamiento cuidadoso permite la precipitación de carburos y nitruros de Nb, V, Ti o Zr, mismos que producen endurecimiento por dispersión además de un tamaño de grano fino (Fig. 11-9c).

Los **aceros bifásicos** contienen una distribución uniforme de ferrita y martensita; con la martensita dispersa, alcanzan resistencias a la cedencia de 60 000 a 145 000 psi. Estos aceros al bajo carbono no contienen suficientes elementos de aleación para tener una buena templabilidad mediante los procesos normales de templado. Pero cuando el acero se calienta hasta la porción ferrita más austenita del diagrama de fases, la fase austenítica se enriquece de carbono, lo que le da la capacidad de endurecimiento necesario. Durante el templado, solo la porción austenítica se transforma en martensita (Fig. 12-25).

Los **aceros martensíticos envejecibles** son aceros bajo carbono muy altamente aleados. Estos aceros se austenitizan y se templan para producir una martensita blanda que contiene menos de 0.3% C. Cuando se envejece la martensita a aproximadamente 500°C, se precipitan compuestos intermetálicos como Ni_3Ti , Fe_2Mo y Ni_3Mo .



Figura 12-25

Microestructura de un acero bifásico, la cual muestra islas de martensita clara en una matriz de ferrita (2500 ×). (De G. Speich, "Physical Metallurgy of Dual-Phase Steels", *Fundamentals of Dual-Phase Steels*, The Metallurgical Society of AIME, 1981.)

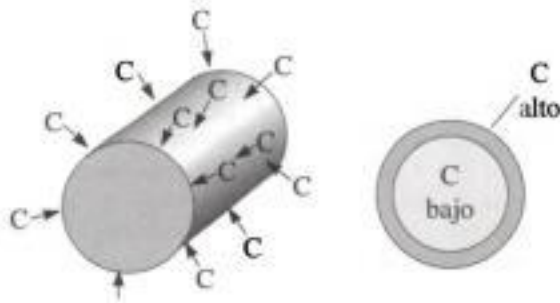


Figura 12-27

Carburizado de un acero bajo carbono con el objeto de producir una superficie de alto carbono, resistente al desgaste.

bajo carbono. En el **carburizado** se difunde el carbono hacia el interior de la superficie del acero a una temperatura por encima de A_1 (Fig. 12-27). En la superficie se produce un alto contenido de carbono gracias a su rápida difusión y a su elevada solubilidad en la austenita. Cuando a continuación el acero es templado y revenido, la superficie se transforma en una martensita de alto carbono revenida, en tanto que el centro de ferrita se conserva blando y dúctil. El espesor de la superficie endurecida, de nuevo llamada profundidad de capa templada, es mucho menor en los aceros carburizados que en los aceros endurecidos por flama o por inducción eléctrica.

El nitrógeno proporciona un efecto de endurecimiento similar al del carbono. En la **cianurización**, el acero se sumerge en un baño de cianuro líquido que permite la difusión en el acero, tanto del carbono como del nitrógeno. En la **carbonitruración**, se genera un gas que contiene monóxido de carbono y amoníaco, difundiéndose en el acero tanto el carbono como el nitrógeno. Finalmente, en la nitruración solo se difunde el nitrógeno dentro de la superficie. La nitruración se efectúa por debajo de la temperatura A_1 .

En cada uno de estos procesos, se introducen en la superficie esfuerzos residuales compresivos, lo que proporciona una excelente resistencia a la fatiga (capítulo 7), además de una buena combinación de dureza, resistencia y tenacidad. El ejemplo siguiente plantea consideraciones para seleccionar tratamientos térmicos como el temple y revenido, además del endurecimiento superficial.

EJEMPLO 12-7 *Diseño de un tratamiento de endurecimiento superficial para un tren de engranes*

Seleccione los materiales y diseñe el tratamiento térmico correspondiente para un eje automotriz y su tren de engranes (Fig. 12-28).

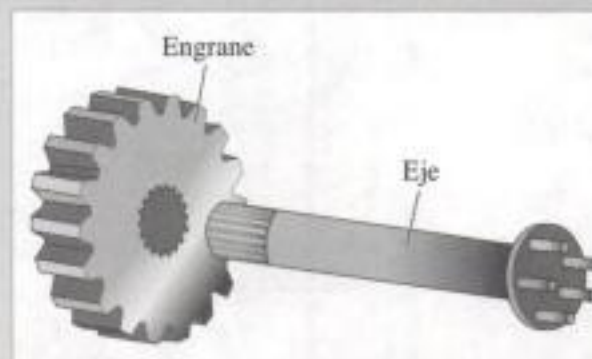


Figura 12-28

Esquema de un ensamble de eje y engranes (para el ejemplo 12-7).

SOLUCIÓN

Ambos componentes necesitan una buena resistencia a la fatiga. El engrane también debe tener suficiente dureza para evitar el desgaste, y el eje una buena resistencia

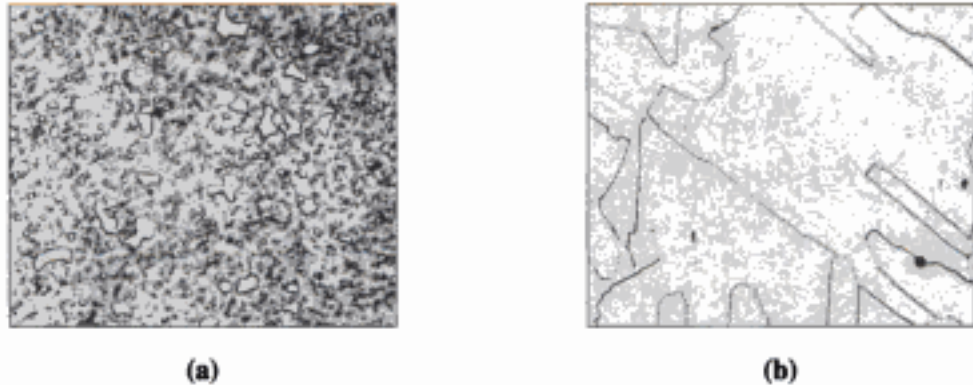


Figura 12-31 (a) Acero inoxidable martensítico conteniendo carburos primarios grandes y carburos pequeños formados durante el revenido (350 $\times$). (b) Acero inoxidable austenítico (500 $\times$). (De ASM Handbook, vols. 7 y 8, (1972, 1973), ASM International, Materials Park, OH 44073).

Aceros inoxidables austeníticos El níquel, que es un *elemento estabilizador de la austenita*, incrementa el tamaño del campo de la austenita y, al mismo tiempo, prácticamente elimina la ferrita de las aleaciones de hierro-cromo-carbono [Fig. 12-30(b)]. Si el contenido de carbono queda por debajo de aproximadamente 0.03%, no se forman carburos y el acero está constituido virtualmente por austenita a la temperatura ambiente [Fig. 12-31(b)].

Los aceros inoxidables austeníticos son cúbicos centrados en las caras (FCC, por sus siglas en inglés) tienen excelente ductilidad, formabilidad y resistencia a la corrosión. La resistencia se obtiene mediante un extenso endurecimiento por solución sólida. Los aceros inoxidables austeníticos pueden ser trabajados en frío para alcanzar mayores resistencias que los aceros inoxidables ferríticos. Éstos no son magnéticos, lo que resulta una ventaja para muchas aplicaciones; por ejemplo, como se vio en el capítulo 11, los *stent* cardiovasculares a menudo se fabrican a partir de aceros inoxidables 316. Desafortunadamente, los contenidos elevados de níquel y de cromo hacen que estas aleaciones sean costosas. La aleación 304 con 18% Cr y 8% Ni (también conocida como inoxidable 18-8) es el grado de acero inoxidable de más amplio uso. Aunque es inoxidable, esta aleación puede sufrir **sensitización**. Cuando se le calienta a una temperatura de ~ 480 - 860°C , carburos de cromo se precipitan a lo largo de los bordes de grano en vez de en el interior de los mismos. Esto causa empobrecimiento en el contenido de cromo en el interior de los granos y hará que el acero inoxidable se corroa con mucha facilidad. Este fenómeno se conoce como sensitización.

Aceros inoxidables endurecidos por precipitación (PH) Los aceros inoxidables endurecidos por precipitación (PH) contienen Al, Nb, o Ta y deben sus propiedades al endurecimiento por solución sólida, endurecimiento por deformación, endurecimiento por envejecimiento y a la reacción martensítica. El acero se calienta primero y se temple para inducir la transformación de austenita en martensita. Al recalentar, se permite que se formen precipitados como el Ni_3Al a partir de la martensita. Se obtienen propiedades mecánicas altas, incluso con aceros de bajo contenido de carbono.

Aceros inoxidables dúplex En algunos casos, en la estructura del acero inoxidable se introducen deliberadamente mezclas de fases. Mediante un control apropiado de la composición y del tratamiento térmico, se puede producir un **acero inoxidable dúplex**, que contiene aproximadamente 50% de ferrita y 50% de austenita. Esta combinación proporciona un conjunto de propiedades mecánicas de resistencia a la corrosión, de formabilidad y soldabilidad que no se obtiene con ningún otro de los aceros inoxidables normales.

La mayoría de los aceros inoxidables son reciclables; el siguiente ejemplo muestra cómo utilizar las diferencias en propiedades para separar distintos tipos de aceros inoxidables.

EJEMPLO 12-9**Diseño de una prueba para separar aceros inoxidable**

A fin de reciclar eficazmente chatarra de acero inoxidable, deseamos separar los aceros inoxidable de alto níquel de los de bajo níquel. Diseñe un procedimiento para lograrlo.

SOLUCIÓN

Resulta tedioso y costoso efectuar análisis químicos sobre cada una de las piezas de la chatarra. Sin embargo, la separación basada en la dureza podría ser más económica, ya que en los distintos tipos de tratamientos, como, por ejemplo, recocido, trabajo en frío o templado y revenido, la dureza podría no estar relacionada con la composición de los aceros.

Los aceros inoxidable de alto níquel son por lo común austeníticos, en tanto que las aleaciones de bajo níquel son ferríticas o martensíticas. Un imán común y corriente resultará atraído por los aceros ferríticos y martensíticos de bajo níquel, pero no por los aceros austeníticos de alto níquel. Podríamos aceptar esta prueba magnética simple y de bajo costo para nuestro proceso de separación.

12-11 Hierros fundidos

Los **hierros fundidos** son aleaciones de hierro-carbono y silicio, que comúnmente contienen de 2 a 4% C y de 0.5 a 3% de Si, y que durante la solidificación pasan a través de la reacción eutéctica. Las microestructuras de los cinco tipos importantes de hierros fundidos se muestran de manera esquemática en la figura 12-32.

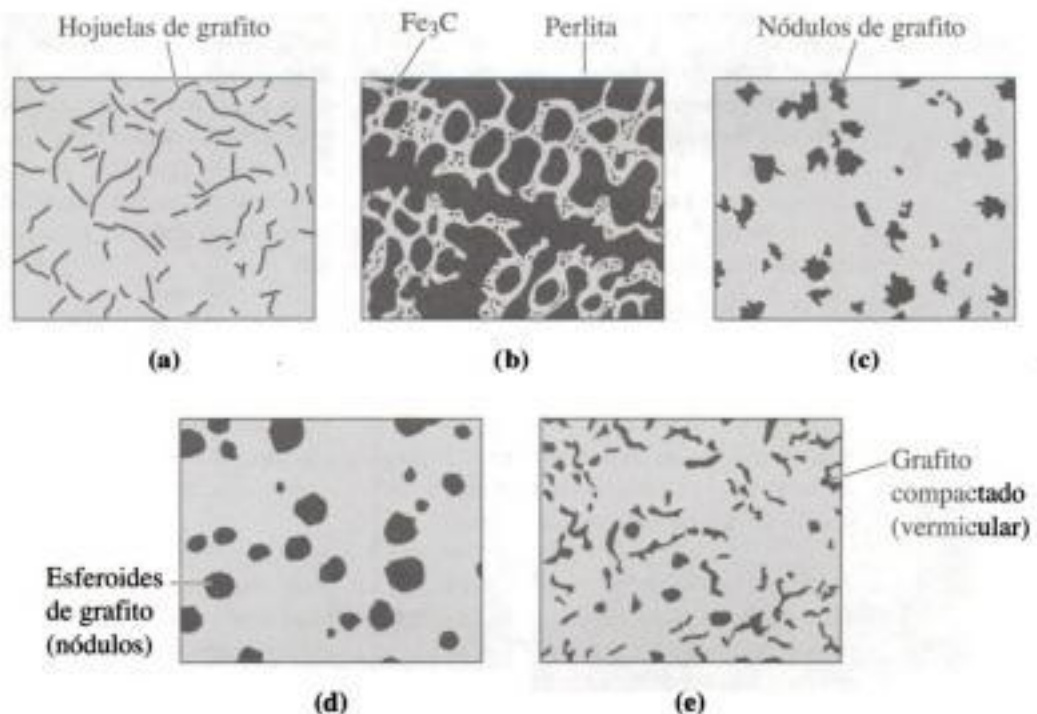


Figura 12-32 Dibujos esquemáticos de los cinco tipos de hierro fundido: (a) fundición gris, (b) fundición blanca, (c) fundición maleable, (d) fundición dúctil o nodular y (e) Hierro con grafito compactado.

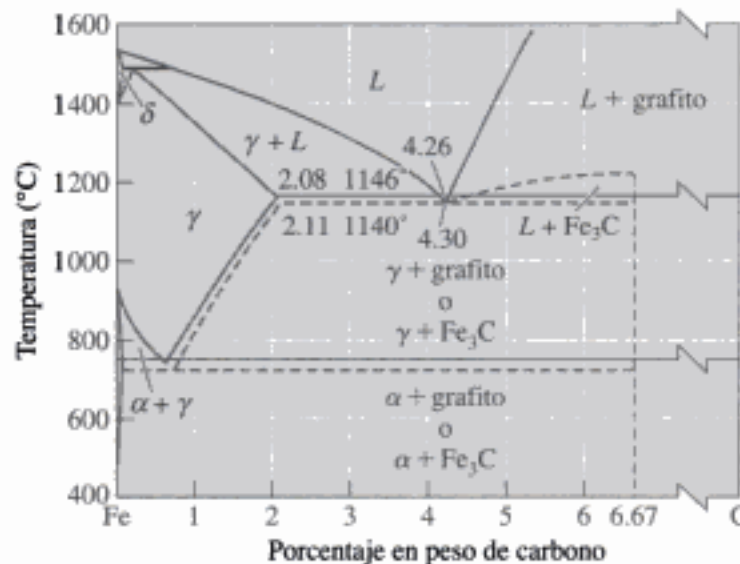


Figura 12-33
Diagrama de fases
hierro-carbono que
muestra la relación entre
los equilibrios estables
hierro-grafito (líneas
continuas) y las reaccio-
nes metaestables hierro-
cementita (líneas
punteadas).

Reacción eutéctica en los hierros fundidos Con base en el diagrama de fases Fe-Fe₃C (líneas punteadas de la Fig. 12-33), la reacción eutéctica que se presenta en las aleaciones Fe-C a 1140°C es:



Esta reacción produce *hierro fundido blanco* con una microestructura compuesta de Fe₃C y de perlita. Sin embargo, el sistema Fe-Fe₃C es realmente un diagrama de fases metaestable. [11] Bajo condiciones de equilibrio verdadero, la reacción eutéctica es:



El diagrama de fases Fe-C aparece en líneas continuas en la figura 12-33. Cuando ocurre la reacción eutéctica estable $L \rightarrow \gamma + \text{grafito}$ a 1146°C, se forma el *hierro gris*, dúctil (nodular) o de *grafito compacto*.

En las aleaciones Fe-C, el líquido se subenfía con facilidad a 6°C (diferencia de temperatura entre las temperaturas eutécticas estables y metaestables) y forma *hierro fundido blanco*. Al agregar al hierro aproximadamente 2% de silicio, se incrementa la diferencia de temperatura entre eutécticos, lo que permite tolerar subenfriamientos mayores y más tiempo para la nucleación y crecimiento del grafito eutéctico estable. El silicio es, por tanto, un elemento *estabilizador del grafito*. Los elementos como el cromo y el bismuto tienen un efecto opuesto y promueven el *hierro fundido blanco*. También podemos introducir elementos inoculantes como el silicio (en forma de ferrosilicio Fe-Si), para promover la nucleación del grafito, o podemos reducir la velocidad de enfriamiento de la fundición para dar más tiempo para el crecimiento del grafito.

El silicio también reduce la cantidad de carbono contenida en el eutéctico. Se puede tomar en consideración este efecto definiendo el **carbono equivalente (CE)**:

$$\text{CE} = \% \text{C} + \frac{1}{3} \% \text{Si} \quad (12-3)$$

La composición eutéctica es siempre cerca de 4.3% CE. Un carbono equivalente elevado promueve el crecimiento del grafito eutéctico.

Reacción eutectoide en los hierros fundidos La estructura de la matriz y las propiedades de cada tipo de hierro fundido están determinadas por la forma en que se transforma la austenita durante la reacción eutectoide. En el diagrama de fases Fe-Fe₃C utilizado para los aceros, la austenita se transformaba en ferrita y en cementita, a menudo en forma de perlita.

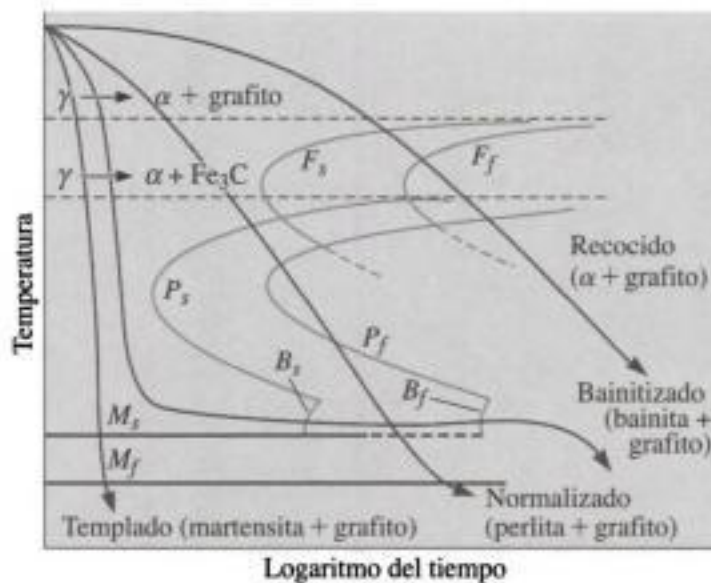


Figura 12-34
Diagrama de transformación para la austenita en un hierro fundido.

Sin embargo, el silicio también promueve la reacción eutectoide *estable*:



Bajo condiciones de equilibrio, los átomos de carbono se difunden de la austenita hacia las partículas de grafito existentes dejando atrás ferrita de bajo carbono. El diagrama de transformación (Fig. 12-34) describe la forma en que podría transformarse la austenita durante el tratamiento térmico. El **recocido** (o enfriamiento en el horno) del hierro fundido forma una matriz ferrítica blanda (no una perlita gruesa como en el caso de los aceros). El normalizado, es decir, el enfriamiento al aire resulta en una matriz perlítica. Los hierros fundidos también se pueden bainitizar para producir bainita, o se pueden temprar para formar martensita y después revenir. El hierro dúctil bainitizado, con resistencias de hasta 200 000 psi, se utiliza para la fabricación de engranes de alto rendimiento.

La **fundición de hierro gris** contiene muchas hojuelas pequeñas e interconectadas de grafito que causan baja resistencia y ductilidad. Ésta es la fundición de hierro de más amplio uso y debe su nombre al color gris mate de la superficie fracturada. La fundición de hierro gris contiene muchos racimos, es decir **celdas eutécticas**, de hojuelas de grafito interconecta-



(a)



(b)

Figura 12-35 (a) Esquema y (b) microfotografía del grafito en hojuelas en la fundición de hierro gris (100 x).

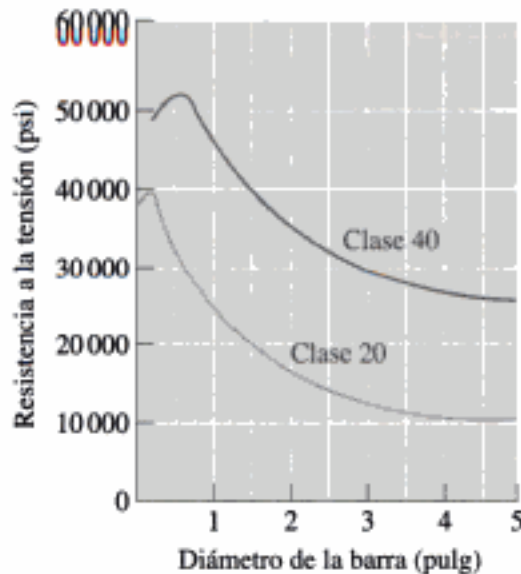


Figura 12-36

Efecto de la velocidad de enfriamiento o del tamaño de la fundición sobre las propiedades a tensión de dos fundiciones de hierro gris.

das (Fig. 12-35). El punto en el cual se conectan estas hojuelas es el núcleo original de grafito. La inoculación ayuda a producir celdas eutécticas más pequeñas, mejorando así la resistencia. Los hierros grises se definen mediante un número de clasificación del 20 al 80. Un hierro gris de clase 20 tiene una resistencia a la tensión nominal de 20 000 psi. Sin embargo, en piezas fundidas gruesas, las hojuelas de grafito gruesas y la matriz ferrítica producen resistencias a la tensión tan bajas como 12 000 psi (Fig. 12-36), en tanto que en las fundiciones delgadas se forma grafito y perlita finos que dan resistencias a la tensión cercanas a los 40 000 psi. Se pueden obtener resistencias aún más elevadas reduciendo el carbono equivalente, aleando o mediante tratamiento térmico. Las hojuelas de grafito concentran esfuerzos y causan baja resistencia y ductilidad, pero la fundición de hierro gris tiene varias propiedades atractivas, como, por ejemplo, una elevada resistencia a la compresión, una buena maquinabilidad, buena resistencia al desgaste por deslizamiento o fricción, buena resistencia a la fatiga térmica, buena conductividad térmica y una buena capacidad de amortiguamiento contra la vibración.

La **fundición de hierro blanco** es una aleación dura y frágil que contiene grandes cantidades de Fe_3C . Una superficie fracturada de este material se ve blanca; de ahí su nombre. Por

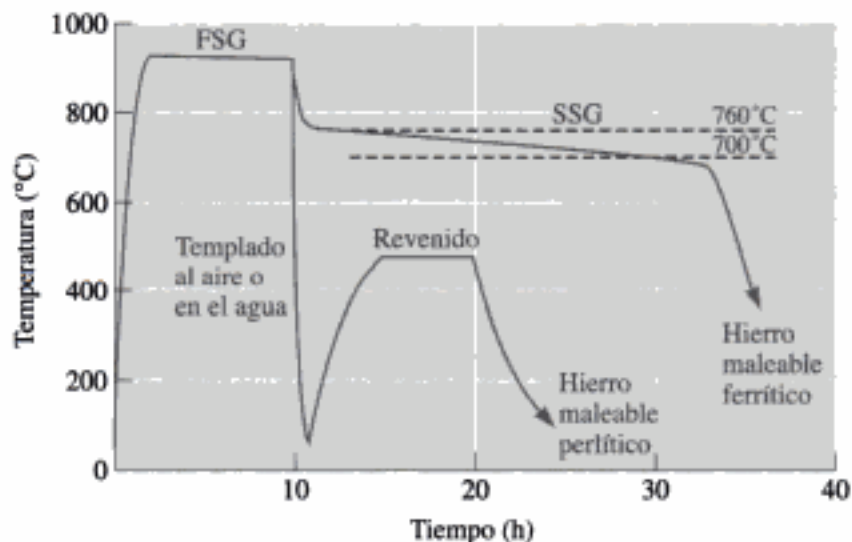


Figura 12-37 Tratamientos térmicos para los hierros maleables ferríticos y perlíticos.

- Los diagramas TEC describen la forma en que la austenita se transforma durante un enfriamiento continuo. Estos diagramas dan las velocidades de enfriamiento necesarias para obtener martensita en los tratamientos térmicos de temple y revenido.
- Las curvas de templabilidad comparan la facilidad con la cual se transforman distintos aceros en martensita.
- Los elementos de aleación incrementan los tiempos requeridos para las transformaciones en los diagramas TTT, reducen las velocidades de enfriamiento para producir martensita en los diagramas TEC y mejoran la templabilidad del acero.
- Los elementos de aleación y los tratamientos térmicos especiales logran propiedades únicas o combinaciones de propiedades únicas. Son de particular importancia los tratamientos de endurecimiento superficial, como el carburizado, que produce una excelente combinación de resistencia a la fatiga y al impacto. Los aceros inoxidable, que contienen un mínimo de 12% Cr, tienen una excelente resistencia a la corrosión.
- Los hierros fundidos, por definición, sufren una reacción eutéctica durante la solidificación. Dependiendo de la composición y del tratamiento, se formarán ya sea γ y Fe_3C , o bien γ y grafito durante la solidificación.
- La fundición de hierro blanco con buena resistencia al desgaste se obtiene al formarse Fe_3C durante la reacción eutéctica. La fundición de hierro maleable, con buena resistencia, ductilidad y tenacidad, se produce mediante un tratamiento térmico de la fundición de hierro blanco para formar grafito esferoidal. La fundición de hierro gris, la fundición de hierro dúctil (o nodular) y la fundición de grafito compacto se producen al generar grafito directamente durante la solidificación. Dado que se forman hojuelas de grafito en el hierro gris, su resistencia y ductilidad resultan limitadas. Las esferas de grafito que se forman en el hierro dúctil (o nodular) como resultado de la adición de magnesio, logran una buena resistencia y ductilidad. Los hierros de grafito compacto tienen propiedades intermedias.

GLOSARIO

Aceros inoxidable dúplex Una clase especial de aceros inoxidable que desarrollan microestructuras de ferrita y austenita.

Aceros bifásicos Aceros especiales tratados para producir una mezcla de martensita dispersa en una matriz de ferrita.

Aceros inoxidable Grupo de aleaciones ferrosas que contienen por lo menos 11% Cr, lo que proporciona una resistencia extraordinaria a la corrosión.

Aceros libres de intersticios Estos aceros contienen Nb y Ti, los que reaccionan con C y S para precipitar carburos y sulfuros, dejando a la ferrita casi libre de elementos intersticiales.

Aceros martensíticos envejecibles Clase especial de aceros de aleación que alcanzan elevadas resistencias mediante una combinación de las reacciones martensíticas y un endurecimiento por envejecimiento.

Aceros para herramienta Grupo de aceros al alto carbono con combinaciones de elevada dureza, tenacidad o resistencia a altas temperaturas.

Arrabio (o hierro cochino) Hierro fundido líquido producido en un alto horno, también conocido como metal fundido. Contiene aproximadamente 95% de hierro, 4% de carbono, 0.3-0.9% de silicio, 0.5% de Mn y 0.025-0.05% de azufre, fósforo y titanio.

Ausformado Tratamiento térmico de origen termomecánico en el cual la austenita se deforma plásticamente por debajo de la temperatura A_1 y, a continuación, se le permite la transformación en bainita o martensita.

Austenita retenida La que no se transforma en martensita durante el templeado debido a la dilatación volumétrica asociada con la reacción.

Austenizado Tratamiento térmico de un acero o de un hierro fundido a una temperatura en la cual se pueda generar austenita homogénea. La austenitización es el primer paso en la mayoría de los tratamientos térmicos para el acero y el hierro fundido.

Bainitizado o austempleado Tratamiento térmico de tipo isotérmico, mediante el cual la austenita se transforma en bainita.

Carbonitruración Endurecimiento de la superficie de un acero mediante carbono y nitrógeno obtenidos a partir de una atmósfera especial de gas.

Carbono equivalente Suma del carbono más una tercera parte del silicio en un hierro fundido.

Carburizado Grupo de técnicas de endurecimiento superficial mediante las cuales el carbono se difunde en el acero.

Celda eutéctica Un racimo de hojuelas de grafito producidas durante la solidificación de hierro gris que están interconectadas a un núcleo común.

Cianurización Endurecimiento de la superficie del acero con carbono y nitrógeno obtenido de un baño de sales de cianuro fundido.

Curvas de templabilidad Gráficas que muestran el efecto de la velocidad de enfriamiento sobre la dureza del acero en la condición de temple.

Degradación de hierros nodulares Pérdida en el efecto del nodulizante o del inoculante en hierros colados como una función del tiempo, permitiendo cambios indeseables en la microestructura y en las propiedades.

Distancia Jominy La distancia desde el extremo templado de una barra (o probeta) Jominy. La distancia Jominy está relacionada a la velocidad de enfriamiento.

Escoria Subproducto de los procesos de fusión o de refinación que, por lo general, contiene muchas impurezas y otros óxidos.

Esferoidita Microconstituyente que contiene partículas gruesas de cementita esferoidal en una matriz de ferrita, lo que permite excelentes características de maquinado en aceros al alto carbono.

Grafitización de segunda etapa (SEG) Segundo paso en el tratamiento térmico de los hierros maleables que deben tener una matriz ferrítica. El hierro se enfría lentamente desde la temperatura de grafitización de la primera etapa, de manera que la austenita se transforma en ferrita y grafito en vez de transformarse en perlita.

Grafito vermicular Grafito redondo e interconectado que se forma durante la solidificación del hierro fundido. Ésta es la forma que se desea en el hierro de grafito compacto, pero en el hierro dúctil es una forma defectuosa.

Grietas de temple Grietas que se forman en la superficie de un acero durante el templeado, debido a los esfuerzos residuales de tensión producidos por el cambio de volumen que acompaña la transformación de austenita en martensita.

Hierro colado gris Hierro fundido que, durante la solidificación, desarrolla hojuelas de grafito provocando resistencia baja y ductilidad pobre. Éste es la clase de hierro fundido más ampliamente usado.

Hierro fundido Aleaciones ferrosas que contienen suficiente carbono de manera que ocurra la reacción eutéctica durante la solidificación.

Hierro fundido blanco Hierro fundido que produce cementita en vez de grafito durante la solidificación. Los hierros de fundición blancos son duros y frágiles.

Hierro fundido de grafito compacto Hierro fundido tratado con pequeñas cantidades de magnesio y titanio que ocasiona que el grafito crezca y precipite en forma de coral e interconectado durante la solidificación, dando propiedades intermedias entre el hierro gris y el dúctil.

Hierro fundido dúctil Hierro fundido tratado con magnesio para que el grafito se precipite, durante la solidificación, en esferoides, obteniéndose resistencia y ductilidad excelentes. También se le conoce como hierro fundido nodular.

Hierro fundido maleable Hierro fundido obtenido mediante un tratamiento térmico largo, durante el cual la cementita se descompone para producir agrupamientos redondeados de grafito. Como resultado de esta estructura, se obtienen buena resistencia, ductilidad y tenacidad.

Horno eléctrico de arco Un horno eléctrico usado para fundir chatarra de acero. Normalmente, los aceros especiales y finos son fabricados en horno eléctrico de arco.

Inoculación La adición de un agente al hierro fundido que aporta sitios de nucleación en donde el grafito precipita durante la solidificación.

Martensita revenida Microconstituyente de ferrita y cementita que se forma al revenir la martensita.

Metal fundido El hierro líquido producido en el alto horno, también conocido como arrabio o hierro cochino. Su contenido es de 95% de hierro, 4% de carbono, 0.3 – 0.9% de silicio, 0.5% Mn y 0.025 – 0.05% de sulfuro, fósforo y titanio.

Nitruración Endurecimiento de la superficie de un acero mediante nitrógeno obtenido de una atmósfera especial de gas.

Nodulización Adición de magnesio a hierro fundido líquido para hacer que el grafito se precipite en esferas, en vez de en hojuelas durante la solidificación.

Normalizado Tratamiento térmico simple obtenido por austenización y enfriamiento al aire para producir una estructura perlítica fina. Se puede aplicar a aceros y a hierros fundidos.

Pico de endurecimiento secundario Dureza extraordinariamente alta de un acero revenido a alta temperatura, causada por la precipitación de los carburos aleados.

Primera etapa de grafitización (PEG) Primera etapa en el tratamiento del hierro maleable, durante la cual los carburos masivos formados durante la solidificación son descompuestos a grafito y austenita.

Profundidad de capa templada Profundidad por debajo de la superficie de un acero en la cual ocurre un endurecimiento mediante procesos de endurecimiento superficial y carburizado.

Prueba Jominy Ensayo usado para evaluar la templabilidad. Una barra austenizada es templada desde uno de sus extremos, de esta manera produciendo un rango de velocidades de enfriamiento a lo largo de dicha barra.

Recocido (acero) Tratamiento térmico utilizado para producir una perlita blanda y gruesa en un acero, mediante la austenitización y, a continuación, un enfriamiento en horno.

Recocido de proceso (o intermedio) Tratamiento térmico a baja temperatura utilizado para eliminar todo o parte del efecto del trabajo en frío en los aceros.

Recocido (hierro fundido) Tratamiento térmico que se utiliza para producir una matriz de ferrita en un hierro fundido mediante la austenitización y, a continuación, un enfriamiento en horno.

Recocido isotérmico Tratamiento térmico de un acero por austenización, enfriamiento rápido a la temperatura de transformación entre A_1 y la nariz de las curvas TTT, y mantenerlo hasta que la austenita se transforme a perlita.

Revenido de hierro fundido Recalentamiento de un hierro maleable para reducir la cantidad de carbono combinado en forma de cementita por la esferoidización de la perlita, de la martensita revenida, o por grafitización de ambos.

Sensitización Los carburos de cromo, cuando se calientan a una temperatura de ~ 480 - 860°C , se precipitan a lo largo de los límites de los granos en vez del interior de los mismos, causando el empobrecimiento del cromo en el interior. Esto hace que el acero inoxidable se corra muy fácilmente.

Templabilidad La facilidad con la que un acero puede ser templado para formar martensita. Aceros con alta templabilidad forman martensita incluso con un enfriamiento lento.

Temple interrumpido (martemplado) Templado de la austenita a una temperatura justo por encima del M_s y manteniéndola así hasta que la temperatura se iguala en todo el acero antes de dejarse enfriar para producir la martensita. Este proceso reduce los esfuerzos residuales y las grietas de temple. También se le conoce como *marrevenido*.

ADICIONAL

1. BRONOWSKI, J. *The Ascent of Man*. Back Bay Books, 1973, pp. 124-131.
2. FRUEHAN, R.J. *The Making, Shaping and Treating of Steel (Steel Making and Refining)*. 11a. ed., R.J. FRUEHAN, ed., The AISE Steel Foundation, 1998.
3. HARPER, C.A. *Handbook of Materials Product Design*. 3a. ed., McGraw Hill, 2001.
4. BERENDSOHN, R. "Germfree House", *Popular Mechanics*, (Mayo), 2002, pp. 104-106.
5. DEARDO, A.J. e I. GARCÍA. *US Patent 6 200 395, Free-Machining Steels Containing Tin Antimony and/or Arsenic*. Universidad de Pittsburgh, 2001.
6. DEARDO, A.J., I. GARCÍA y M. HUA. *Technical discussions and assistance are acknowledged*, 2002.
7. EYLON, D. y H.H. SUZUKI. "On the Use of Lamination in the Making of Iron and Steel Swords", en *The Fifth International Conference on the Beginning of Metals and Alloys*, Kyongju, Korea, 2002.
8. DAVID, S.A. y T. DEBROY. "Current Issues and Problems in Welding Science", *Science*, 257, 1992, pp. 497-502.
9. DEBROY, T. y S.A. DAVID. "Physical Processes in Fusion Welding", *Reviews of Modern Physics*, 67(1), 1995, pp. 85-112.
10. PATIL, B. "Stainless Steel Making", en *The Making, Shaping and Treating of Steel (Steel Making and Refining)*, R.J. FRUEHAN, ed., The AISE Steel Foundation, 1998.
11. BERGERON, C.G. y S.H. RISBUD. *Introduction to Phase Equilibria*. American Ceramic Society, 1984.

PROBLEMAS

- 12-1 Explique la forma en que se produce el acero a partir del mineral de hierro y de la chatarra de acero.

- a) 38% perlita-62% ferrita primaria
- b) 93% perlita-7% cementita primaria
- c) 97% ferrita-3% cementita
- d) 86% ferrita-14% cementita

Sección 12-1 Designaciones y clasificación de los aceros

- 12-2 ¿Cuál es la diferencia entre los hierros fundidos y los aceros?
- 12-3 ¿Qué representan las temperaturas A_1 , A_2 y A_{cm} ? ¿Estas temperaturas son constantes?
- 12-4 Calcule las cantidades de ferrita, cementita, microconstituyente primario y perlita en los siguientes aceros:
- a) 1015 b) 1035 c) 1095 d) 10130
- 12-5 Estime el número AISI-SAE para aceros que tengan las microestructuras siguientes:

- 12-6 Complete la tabla siguiente:

	Acero 1035	Acero 10115
Temperatura A_1		
Temperatura A_2 o A_{cm}		
Temperatura de recocido total		
Temperatura de normalizado		
Temperatura de recocido de proceso		
Temperatura de esferoidización		

12-7 ¿Qué significan los términos aceros bajo, medio y alto carbono?

Sección 12-2 Tratamientos térmicos simples

Sección 12-3 Tratamientos térmicos isotérmicos

- 12-8 Explique los tratamientos térmicos siguientes: a) recocido de proceso, b) austenitizado, c) recocido total, d) normalizado y e) templado.
- 12-9 Explique por qué, estrictamente hablando, se pueden utilizar los diagramas TTT solo para tratamientos isotérmicos.
- 12-10 En un acero 1080 perlítico, las laminillas de cementita tienen un espesor de 4×10^{-5} cm, y las de ferrita un espesor de 14×10^{-5} cm. En un acero 1080 esferoidizado, las esferas de cementita tienen un diámetro de 4×10^{-3} cm. Estime el área total de interfaz entre la ferrita y la cementita en un centímetro cúbico de cada uno de estos aceros. Determine el porcentaje de reducción en el área superficial al esferoidizar el acero perlítico. La densidad de la ferrita es de 7.87 g/cm³ y la de la cementita es de 7.66 g/cm³.
- 12-11 Describa la microestructura presente en un acero 1050 después de cada uno de los pasos de los tratamientos térmicos siguientes:
- caliente a 820 °C, temple a 650 °C, mantenga así durante 90 segundos y temple luego a 25 °C,
 - caliente a 820 °C, temple a 450 °C, mantenga así durante 90 segundos y temple luego a 25 °C,
 - caliente a 820 °C, temple a 25 °C,
 - caliente a 820 °C, temple a 720 °C, mantenga así durante 100 segundos y temple luego a 25 °C,
 - caliente a 820 °C, temple a 720 °C, mantenga así durante 100 segundos, temple a 400 °C y manténgalo así durante 500 segundos y temple a 25 °C,
 - caliente a 820 °C, temple a 720 °C, mantenga así durante 100 segundos, temple a 400 °C y manténgalo así durante 10 segundos y temple a 25 °C,
 - caliente a 820 °C, temple a 25 °C, caliente a 500 °C y mantenga así durante 10³ segundos, y enfríe al aire a 25 °C.
- 12-12 Describa la microestructura presente en un acero 10110 después de cada uno de los pasos de los tratamientos térmicos siguientes:
- caliente a 900 °C, temple a 400 °C y manténgalo así durante 10³ segundos y temple a 25 °C,
 - caliente a 900 °C, temple a 600 °C y manténgalo así durante 50 segundos y temple a 25 °C,
 - caliente a 900 °C, y temple a 25 °C,
 - caliente a 900 °C, temple a 300 °C y manténgalo así durante 200 segundos y temple a 25 °C,
 - caliente a 900 °C, temple a 675 °C y manténgalo así durante 1 segundo y temple a 25 °C,
 - caliente a 900 °C, temple a 675 °C y manténgalo así durante 1 segundo, temple a 400 °C manteniéndolo durante 900 segundos y enfríe lentamente a 25 °C,
 - caliente a 900 °C, temple a 675 °C y manténgalo así durante 1 segundo, temple a 300 °C y manténgalo durante 10³ segundos y enfríe al aire a 25 °C,
 - caliente a 900 °C, temple a 300 °C y manténgalo así durante 100 segundos, temple a 25 °C, caliente a 450 °C durante 3 600 segundos y enfríe a 25 °C.
- 12-13 Recomiende tratamientos térmicos apropiados para obtener lo siguiente, incluyendo temperaturas y tiempos apropiados:
- un acero 1050 recocido isotérmicamente con HRC 23,
 - un acero 10110 recocido isotérmicamente con HRC 40,
 - un acero 1080 recocido isotérmicamente con HRC 38,
 - un acero 1050 bainitizado con HRC 40,
 - un acero 10110 bainitizado con HRC 55 y
 - un acero 1080 bainitizado con HRC 50.
- 12-14 Compare los tiempos mínimos requeridos para recocer isotérmicamente los siguientes aceros a 600 °C. Analice el efecto del contenido de carbono sobre el acero en la cinética de la nucleación y del crecimiento durante el tratamiento térmico.
- 1050
 - 1080
 - 10110

Sección 12-4 Tratamientos térmicos de templado y revenido

- 12-15 Explique los siguiente términos: a) templado, b) revenido, c) austenita retenida y d) martemplado/temple interrumpido.
- 12-16 Deseamos producir un acero 1050 con una dureza Brinell de por lo menos 330 y un porcentaje de elongación de por lo menos 15%.
- Recomiende un tratamiento térmico, incluyendo las temperaturas apropiadas, que permita lograr lo anterior. Determine la resistencia de cedencia y a la tensión que se obtienen mediante este tratamiento térmico.
 - ¿Qué resistencia de cedencia y a la tensión se obtendría en un acero 1080 utilizando el mismo tratamiento térmico?
 - ¿Qué resistencia de cedencia, a la tensión y cuál sería el porcentaje de elongación que se obtendría en un acero 1050 si se normalizara?
- 12-17 Deseamos producir un acero 1050 con una resistencia de cedencia de por lo menos 175 000 psi y una reducción en área de por lo menos 50%.
- Recomiende un tratamiento térmico, incluyendo las temperaturas apropiadas, que permita lograr lo anterior. Determine el número de dureza Brinell,

el porcentaje de elongación y la resistencia de cedencia que se obtienen mediante este tratamiento térmico.

- b) ¿Qué resistencia de cedencia y a la tensión se obtendrían en un acero 1080 utilizando el mismo tratamiento térmico?
- c) ¿Qué resistencia de cedencia, resistencia a la tensión y el porcentaje de elongación se obtendrían en el acero 1050 si se le recociera?

12-18 A un acero 1030 se le da un tratamiento térmico de templeado y revenido inadecuado, produciendo una estructura final formada por 60% de martensita y 40% de ferrita. Estime el contenido de carbono de la martensita y la temperatura de austenización utilizada. ¿Qué temperatura de austenización recomendaría usted?

12-19 Es necesario austenizar un acero 1050 a 820 °C, templarlo en aceite hasta 25 °C y revenirlo a 400 °C durante un tiempo adecuado.

- a) ¿Qué resistencia de cedencia, dureza y porcentaje de elongación esperaría usted obtener con este tratamiento térmico?
- b) Suponga que la resistencia a la cedencia del acero resulta ser 125 000 psi. ¿Qué es lo que pudo haber ocurrido durante el tratamiento térmico para causar esta resistencia baja?
- c) Suponga que se encuentra una dureza de HB 525. ¿Qué salió mal en el tratamiento térmico para causar esta dureza elevada?

12-20 Un componente producido a partir de un acero de baja aleación de 0.2% C (Fig. 12-17) tiene después del templeado una microestructura que contiene ferrita, perlita, bainita y martensita. ¿Qué microestructura se obtendría en caso de utilizar un acero 1080? ¿Qué microestructura se obtendría si se tratara de un acero 4340?

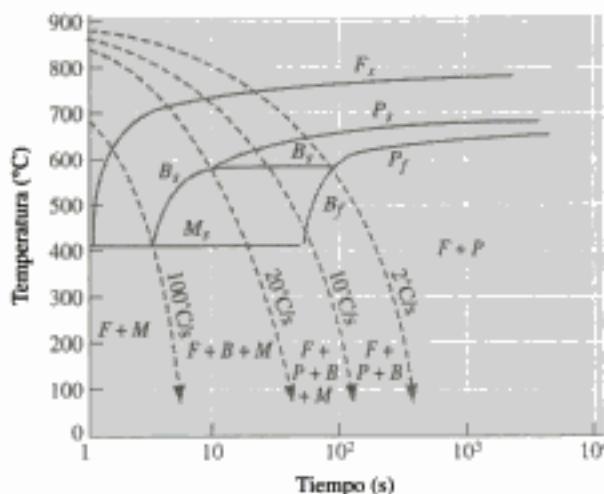


Figura 12-17 (Repetida para el problema 12-20). Diagrama TEC para un acero de baja aleación, con 0.2% C.

12-21 En un acero 1080 templeado encontramos perlita fina y una pequeña cantidad de martensita. ¿Qué microestructura debe esperarse en caso de haber utilizado un acero de baja aleación, con 0.2% C? ¿Qué microestructura se obtendría en caso de utilizar acero 4340?

12-22 Explique el origen del agrietamiento por templeado.

12-23 ¿Cuáles son los diferentes medios utilizados para el templeado de los aceros? Explique por qué el agitar dicho medio proporciona mejores velocidades de transferencia de calor.

Sección 12-5 Efecto de los elementos de aleación

Sección 12-6 Aplicación de la templabilidad

12-24 Explique brevemente por qué se utilizan elementos de aleación en los aceros.

12-25 Explique la diferencia entre templabilidad y dureza. Explique, utilizando un esquema, la forma en que se mide la templabilidad en los aceros.

12-26 Se ha encontrado que un acero 1070, cuando es austenizado a 750 °C, forma una estructura que contiene perlita y una pequeña cantidad de ferrita en los límites de grano, la cual alcanza una resistencia y ductilidad aceptables. ¿Qué cambios en la microestructura, si existe alguno, se esperaría si el acero 1070 tuviera un elemento de aleación como el Mo o el Cr? Explique.

12-27 Usando los diagramas TTT, compare las templabilidades de los aceros 4340 y 1050 determinando los tiempos necesarios para la transformación isotérmica de la ferrita y de la perlita (F_s , P_s y P_f) para que ocurra a 650 °C.

12-28 Deseáramos obtener una dureza HRC 38 a 40 en un acero templeado. ¿Qué rango de velocidades de enfriamiento deberíamos obtener para los aceros siguientes? ¿Son todos apropiados o existe alguno inapropiado?

- a) 4340 b) 8640 c) 9310
- d) 4320 e) 1050 f) 1080

12-29 Un componente de acero debe tener una dureza después del templeado de HRC 35, a fin de evitar velocidades de desgaste excesivas durante el servicio. Cuando el componente se fabrica partiendo de acero 4320, la dureza solo alcanza HRC 32. Determine la dureza si la pieza se fabricara bajo condiciones idénticas, pero con los aceros siguientes. ¿Cuál, si es que existe alguno, de estos aceros sería una mejor elección que el 4320?

- a) 4340 b) 8640 c) 9310
- d) 1050 e) 1080

12-30 Una pieza producida con un acero 4320 tiene una dureza en condición de temple de HRC 35 en una región crítica. Determine

- a) La velocidad de enfriamiento en dicho punto, y
b) La microestructura y la dureza que se obtendrían si la pieza se fabricara con acero 1080.
- 12-31 Un acero 1080 es enfriado a la máxima velocidad posible para obtener una estructura de 100 % de perlita. ¿Cuál es esta velocidad de enfriamiento? ¿Qué distancia de Jominy y qué dureza deben esperarse para esta velocidad de enfriamiento?
- 12-32 Determine la dureza y la microestructura en el centro de una barra de acero 1080 de 1.5 pulg de diámetro producida al templarse en:
a) aceite sin agitar,
b) agua sin agitar y
c) salmuera con agitación.
- 12-33 Una barra de dos pulgadas de diámetro de acero 4320 debe tener una dureza de por lo menos HRC 35. ¿Cuál es la severidad de temple mínima (coeficiente H)? ¿Qué tipo de medio de temple recomendaría usted para producir la dureza deseada con una mínima posibilidad de agrietamiento por templado?
- 12-34 Una barra de acero debe templarse en agua con agitación. Determine el diámetro máximo de la barra que produzca una dureza mínima de HRC 40 si la barra está hecha de acero
a) 1050 b) 1080 c) 4320
d) 8640 e) 4340
- 12-35 El centro de una barra de acero 4320 de una pulgada de diámetro tiene una dureza de HRC 40. Determine la dureza y la microestructura en el centro de una barra de dos pulgadas de acero 1050 templada en el mismo medio.

Sección 12-7 Aceros especiales

- 12-36 Explique el significado de los términos siguientes: a) aceros para herramienta, b) aceros bifásicos, c) aceros martensíticos envejecibles y d) aceros de baja aleación y alta resistencia.
- 12-37 ¿Qué material se utiliza para fortalecer con hierro los cereales del desayuno?

Sección 12-8 Tratamientos superficiales

- 12-38 ¿Cuál es el principio en que se basa el endurecimiento superficial de los aceros mediante carburizado y nitrurado?
- 12-39 Un acero 1010 debe carburizarse utilizando una atmósfera de gas que pueda producir 1.0% C en la superficie del acero. La profundidad de capa cementada se define como la distancia por debajo de la superficie que contenga por lo menos 0.5% C. Si el carburizado se efectúa a 1000°C, determine el tiempo requerido para producir una profundidad de capa cementada de 0.01 pulg. (Véase el capítulo 5 para un repaso.)

- 12-40 Un acero 1015 debe carburizarse a 1050 °C durante dos horas utilizando una atmósfera de gas que produce 1.2% C en la superficie del acero. Trace el porcentaje de carbono en función de la distancia desde la superficie del acero. Si después del carburizado el acero es enfriado lentamente, determine la cantidad de cada fase y de cada microconstituyente a intervalos de 0.002 pulg partiendo desde la superficie (véase el capítulo 5).
- 12-41 ¿Cuál es la razón por la cual la resistencia en la zona afectada por el calor en una soldadura es más elevada en el caso de aceros al bajo carbono? ¿Cuál es, en este caso, la función que desempeña la austenita retenida?
- 12-42 ¿Cuál es la razón por la cual es más fácil soldar aceros bajo carbono y sin embargo resulta difícil soldar los aceros alto carbono?
- 12-43 Un acero 1050 es soldado. Después de enfriarse se obtiene la dureza en el área afectada por el calor en varios puntos partiendo del borde de la zona de fusión. Determine la dureza esperada en cada uno de los puntos si se soldara un acero 1080 en las mismas condiciones. Estime la forma de la microestructura en cada punto del acero 1080 soldado.

Distancia desde el borde zona de fusión	Dureza en la de la soldadura 1050
0.05 mm	HRC 50
0.10 mm	HRC 40
0.15 mm	HRC 32
0.20 mm	HRC 28

Sección 12-10 Aceros inoxidables

- 12-44 ¿Qué es un acero inoxidable? ¿Por qué son inoxidables los aceros inoxidables?
- 12-45 Deseamos producir un acero inoxidable martensítico con 17% de Cr. Recomiende un contenido de carbono y una temperatura de austenizado que nos permita obtener durante el templado un 100% de martensita. ¿Qué microestructura se produciría si a continuación la martensita se templara hasta la formación de las fases de equilibrio?
- 12-46 ¿Qué es la sensitización?
- 12-47 ¿Cuáles son las diferentes clases de aceros inoxidables? ¿Cuál de ellas es la más utilizada?
- 12-48 Ocasionalmente, al soldar un acero inoxidable austenítico, el depósito soldado resulta ligeramente magnético. Con base en el diagrama de fases Fe-Cr-Ni-C [Fig. 12-30(b)], ¿cuál de las fases piensa usted que está causando el comportamiento magnético? ¿Por qué se formó dicha fase? ¿Qué es lo que se podría hacer para restaurar un comportamiento no magnético?

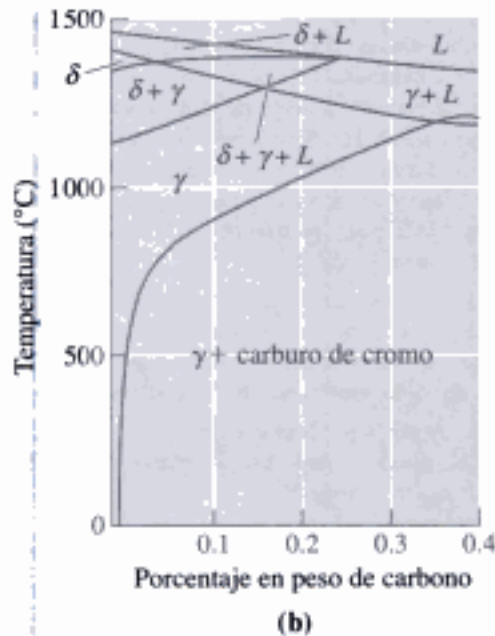


Figura 12-30 (Repetida para el problema 12-48). (b) Sección del diagrama de fases hierro-cromo-níquel-carbono a una constante de 18% Cr-8% Ni. Con bajos contenidos de carbono, la austenita es estable a la temperatura ambiente.

Sección 12-11 Hierros fundidos

- 12-49 Utilizando el diagrama de fases Fe-Fe₃C, defina qué es el hierro fundido.
- 12-50 ¿Cuáles son los diferentes tipos de hierros fundidos? Explique mediante un esquema.
- 12-51 Una barra de tensión de un fundición gris clase 40 tiene una resistencia a la tensión de 50 000 psi. ¿Por qué es la resistencia a la tensión más elevada que la correspondiente al número de clase? ¿Cuál piensa usted que es el diámetro de la barra de prueba?
- 12-52 Desearíamos producir una fundición de hierro gris que se solidifique sin generar austenita primaria o grafito. Si el contenido de carbono en el hierro es de 3.5%, ¿cuál es el porcentaje de silicio que deberá agregar?
- 12-53 Compare las templabilidades esperadas en un acero bajo carbono, en un hierro fundido maleable y en un hierro fundido dúctil. Explique por qué espera que tengan diferentes templabilidades.



Problemas de diseño

- 12-54 Desearíamos producir una placa de desgaste de acero de dos pulgadas de espesor para una unidad triturado-

ra de piedra. Para evitar un reemplazo frecuente de la placa de desgaste, la dureza a una profundidad de 0.25 pulg de la superficie deberá exceder HRC 38. Sin embargo, el centro de la placa deberá tener una dureza no mayor de HRC 32 para garantizar algo de tenacidad. Solamente tenemos disponible templado al agua. Diseñe la placa, suponiendo que solamente contamos con los aceros que aparecen en la figura 12-23.

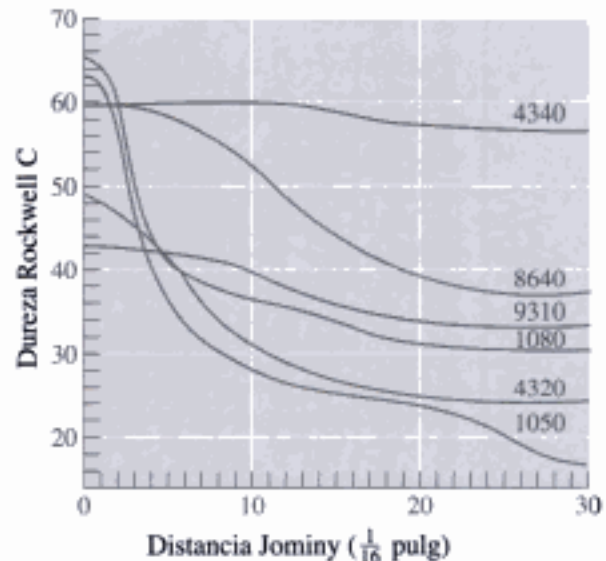


Figura 12-23 (Repetida para el problema 12-54). Curvas de templabilidad para diversos aceros.

- 12-55 Se ha encontrado que un acero 10110 templado y revenido tiene grietas superficiales, por lo que el cliente rechaza la pieza tratada térmicamente. ¿A qué se debe la formación de dichas grietas? Diseñe un tratamiento térmico, incluyendo temperaturas y tiempos apropiados para minimizar estos problemas.
- 12-56 Diseñe un acero resistente a la corrosión para utilizarse en una bomba que mueve helio líquido a 4 K en un imán superconductor.
- 12-57 Diseñe un tratamiento térmico para un gancho fabricado a partir de una varilla de acero de una pulgada de diámetro con una microestructura que contiene, después del templado, una mezcla de ferrita, bainita y martensita. Estime las propiedades mecánicas del gancho.
- 12-58 Diseñe un tratamiento de recocido para un acero 1050. Asegúrese de incluir detalles de temperaturas, velocidades de enfriamiento, microestructuras y propiedades.
- 12-59 Diseñe un proceso para la fabricación de una flecha de acero de 0.5 cm de diámetro con excelente tenacidad y, además, muy buena resistencia al desgaste y a la

fatiga. La dureza superficial deberá ser de por lo menos HRC 60 y la dureza a una profundidad de 0.01 cm por debajo de la superficie debe ser de aproximadamente HRC 50. Describa el proceso, dando detalles de la atmósfera para el tratamiento térmico, la composición, temperatura y tiempos del acero.



Problema en computadora

- 12-60 *Relaciones empíricas para las transformaciones en los aceros.* El tratamiento térmico de los aceros depende de la posibilidad de conocer las temperaturas

A_1 , A_2 , A_{cm} , M_s y M_f . Los fabricantes de aceros a menudo proporcionan a sus clientes fórmulas empíricas que definen dichas temperaturas en función de las concentraciones de elementos de aleación. Por ejemplo, una de dichas fórmulas es:

$$\begin{aligned} M_s(\text{en } ^\circ\text{C}) = & 561 - 474(\%C) - 33(\%Mn) \\ & - 17(\%Ni) - 17(\%Cr) \\ & - 21(\%Mo) \end{aligned}$$

Escriba un programa que pida al usuario que proporcione información para las concentraciones de los diferentes elementos de aleación y que estime las temperaturas M_s y M_f . Suponga que la temperatura M_f es de 215°C por debajo de M_s .

By Arkanosant...

Capítulo



Cada año, aproximadamente medio millón de personas reciben un implante de cadera como el de la fotografía. El implante debe fabricarse con un material biocompatible que tenga gran tenacidad a la fractura, una excelente vida a la fatiga, resistencia a la corrosión y una rigidez similar a la del hueso. En esta aplicación se usan aleaciones no ferrosas basadas en titanio. (Cortesía de PhotoDisc/Getty Images.)

Aleaciones no ferrosas

¿Alguna vez se preguntó...

- ...en la historia de la humanidad, ¿qué fue primero, el cobre o el acero?
- ...por qué la Estatua de la Libertad tiene una pátina verde?
- ...qué materiales se utilizan para manufacturar implantes biomédicos para las prótesis de cadera?
- ...sería posible la fabricación de automóviles de aluminio?
- ...qué combustible sólido alimenta a los auxiliares de propulsión a reacción del transbordador espacial a una velocidad cercana a los 5000 km por hora?
- ...qué materiales se utilizan como "catalizadores" en el convertidor catalítico de los automóviles? ¿Qué es lo que "convierten" estos catalizadores?

Las aleaciones no ferrosas (es decir, aleaciones de elementos distintos al hierro) incluyen, pero no están limitados a, aleaciones base aluminio, cobre, níquel, cobalto, zinc, metales preciosos (como Pt, Au, Ag, Pd) y otros metales (por ejemplo, Nb, Ta, W). En este capítulo exploraremos someramente las propiedades y aplicaciones de las aleaciones de Cu, Al y Ti en aplicaciones

sujetas a cargas dinámicas. No se analizarán las aplicaciones de índole electrónica, magnética y otras aplicaciones de las aleaciones no ferrosas.

En muchas aplicaciones, el peso es un factor crítico. Con el objeto de relacionar la resistencia de un material con su peso, es decir su **resistencia específica**, se define una relación resistencia a peso:

$$\text{Resistencia específica} = \frac{\text{Resistencia}}{\text{Densidad}} \quad (13-1)$$

La tabla 13-1 compara la resistencia específica del acero, de algunas aleaciones no ferrosas de alta resistencia y de materiales compuestos de matriz polimérica. Otro factor que debe tomarse en cuenta en el diseño de metales no ferrosos es su costo, el cual varía de manera considerable. La tabla 13-1 incluye el precio aproximado de diferentes materiales; sin embargo, es necesario tomar en cuenta que el precio del material es sólo una pequeña porción del costo del componente. A menudo la fabricación y el acabado, y ni hablar

de la mercadotecnia y de la distribución, contribuyen mucho más al costo general de una pieza. Los materiales compuestos basados en carbono y otras fibras tienen también ventajas significativas en relación con su resistencia específica. Sin embargo, sus propiedades podrían ser anisotrópicas y la temperatura a la cual pueden ser utilizados es limitada. En la práctica, con el objeto de superar la anisotropía, los materiales compuestos se suelen fabricar con muchas capas. En las diferentes capas se alterna la dirección de las fibras a fin de minimizar la anisotropía en sus propiedades.

TABLA 13-1 ■ Resistencia específica y costo de aleaciones no ferrosas, aceros y materiales compuestos de matriz polimérica

Metal	Densidad		Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia específica (in)	Costo por lb (\$) ^c
	g/cm ³	(lb/in ³)			
Aluminio	2.70	(0.097)	83 000	8.6×10^5	0.60
Berilio	1.85	(0.067)	55 000	8.2×10^5	350.00
Cobre	8.93	(0.322)	150 000	4.7×10^5	0.71
Plomo	11.36	(0.410)	10 000	0.2×10^5	0.45
Magnesio	1.74	(0.063)	55 000	8.7×10^5	1.50
Níquel	8.90	(0.321)	180 000	5.6×10^5	4.10
Titanio	4.51	(0.163)	160 000	9.8×10^5	4.00
Tungsteno	19.25	(0.695)	150 000	2.2×10^5	4.00
Zinc	7.13	(0.257)	75 000	2.9×10^5	0.40
Aceros	~7.87	(0.284)	200 000	7.0×10^5	0.10
Aramida/epóxico	1.4	(0.05)	200 000	4.0×10^6	—
(Kevlar, fracción volumétrica de las fibras 0.6, tensión longitudinal)					
Aramida/epóxico	1.4	(0.05)	4 300	0.86×10^4	—
(Kevlar, fracción volumétrica de las fibras 0.6, tensión transversal) ^a					
Vidrio/epóxico	2.1	(0.075)	150 000	2.0×10^6	—
(Fracción volumétrica de las fibras de vidrio-E 0.6, tensión longitudinal) ^b					
Vidrio/epóxico	2.1	(0.075)	7 000	9.3×10^4	—
(Fracción volumétrica de las fibras de vidrio-E 0.6, tensión transversal)					

^a Datos de los materiales compuestos de Harper, C. A., Handbook of Materials Product Design, 3a. ed. 2001: McGraw-Hill. Los materiales compuestos usados como materia prima son relativamente económicos; los materiales compuestos de alto rendimiento son costosos.

^b Las propiedades de los materiales compuestos son muy anisotrópicas. Esto se supera, sin embargo, durante su fabricación.

^c Costo basado en precios promedio para los años 1998 a 2002.

13-1 Aleaciones de aluminio

El aluminio es el tercer elemento más abundante sobre la Tierra (después del oxígeno y del silicio), pero, hasta finales del siglo XIX, era costoso y difícil de producir. El casquete de seis libras instalado en 1884 en la parte superior del monumento a Washington fue uno de los

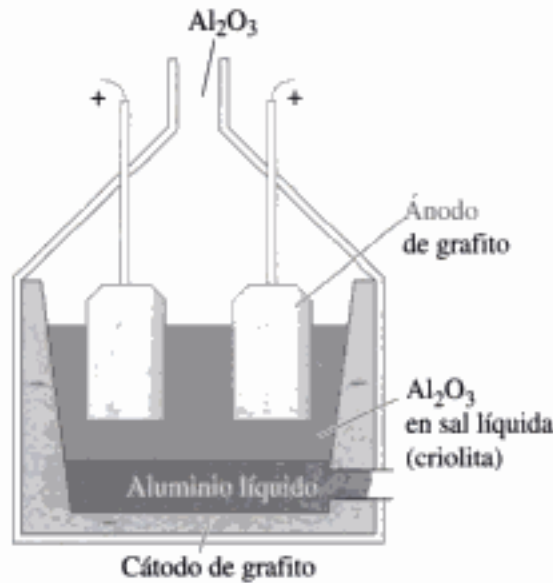
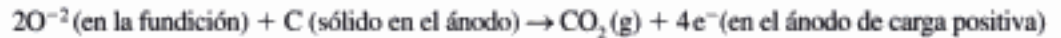


Figura 13-1 Producción del aluminio en una celda electrolítica

componentes de aluminio más grandes fabricados en esas fechas.[2] El desarrollo de la energía eléctrica y el **proceso Hall-Heroult** [3] para la reducción electrolítica de la alúmina (Al_2O_3) a un metal de Al líquido (Fig. 13-1) permitió que el aluminio se convirtiera en uno de los materiales de ingeniería más económicos y extensamente utilizados. En este proceso la alúmina se convierte en un material conocido como criolita fundida (Na_3AlF_6). Entonces en una celda electrolítica ocurren las siguientes reacciones:



En el cátodo se forma aluminio fundido. El ánodo hecho de grafito se consume durante la reacción.

Propiedades generales y usos del aluminio El aluminio tiene una densidad de 2.70 g/cm^3 , es decir, la tercera parte de la densidad del acero, y un módulo de elasticidad de $10 \times 10^6 \text{ psi}$. A pesar de que las aleaciones de aluminio tienen propiedades a la tensión inferiores a las del acero, su resistencia específica (es decir, su relación resistencia a peso) es excelente. Por esta razón, los hermanos Wright utilizaron una aleación Al-Cu en su motor (capítulo 11).[4] El aluminio se puede conformar con facilidad, tiene una elevada conductividad eléctrica y térmica, y a bajas temperaturas no presenta una transición de dúctil a frágil.[5] No es tóxico y se puede reciclar mediante sólo el 5% de la energía que fue necesaria para su fabricación a partir de la alúmina. Ésta es la razón por la cual tiene tanto éxito el reciclaje del aluminio. Las propiedades físicas benéficas del aluminio incluyen un comportamiento no magnético y su resistencia a la oxidación y a la corrosión. Sin embargo, el aluminio no exhibe un límite de resistencia a la fatiga verdadero (capítulo 6), por lo que en algún momento, incluso a esfuerzos reducidos, puede ocurrir la falla debido a la fatiga. Debido a su bajo punto de fusión, el aluminio no funciona bien a temperaturas altas. Además, las aleaciones de aluminio tienen dureza baja y, en consecuencia, su resistencia al desgaste es pobre. El aluminio muestra una buena respuesta a los mecanismos de endurecimiento. La tabla 13-2 compara la resistencia de aluminio puro recocido con la de aleaciones endurecidas mediante varias técnicas. Las aleaciones pueden llegar a ser hasta 30 veces más resistentes que el aluminio puro.

Aproximadamente el 25% del aluminio que se produce hoy día se utiliza en la industria del transporte, otro 25% en la manufactura de latas para bebidas y otros empaques, 15% en la construcción, 15% en aplicaciones eléctricas y 20% en otras aplicaciones.[6] Aproximadamente

TABLA 13-2 ■ Efecto de los mecanismos de endurecimiento en el aluminio y sus aleaciones

Material	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia de cedencia (psi)	% de elongación	Relación de la resistencia de cedencia de la aleación del metal puro
Aluminio puro	6,500	2,500	60	1
Aluminio puro comercial (por lo menos 99% puro)	13,000	5,000	45	2.0
Aleación de aluminio endurecida por solución sólida	16,000	6,000	35	2.4
Aluminio trabajado en frío	24,000	22,000	15	8.8
Aleación de aluminio endurecida por dispersión	42,000	22,000	35	8.8
Aleación de aluminio endurecida por envejecimiento	83,000	73,000	11	29.2

200 lb de aluminio fueron utilizadas en el automóvil promedio fabricado en Estados Unidos en 1996.[1] El aluminio reacciona con el oxígeno, incluso a la temperatura ambiente, para producir una capa de óxido de aluminio extremadamente delgada que protege el metal subyacente contra muchos entornos corrosivos. Sin embargo, es necesario tener cuidado de no generalizar este comportamiento. Por ejemplo, el polvo de aluminio (en razón a su elevada área superficial), cuando está en presencia de un oxidante, como el perclorato de amonio y el óxido de hierro como catalizadores, sirve como combustible sólido para los propulsores auxiliares a reacción (SRB, *solid rocket boosters*). Estos propulsores auxiliares utilizan ~200 000 lb de polvo de aluminio

TABLA 13-3 ■ Designaciones de las aleaciones de aluminio

Aleaciones para forja:

1xxx ^a	Aluminio comercialmente puro (>99% Al)	No endurecible por envejecimiento
2xxx	Al-Cu y Al-Cu-Li	Endurecible por envejecimiento
3xxx	Al-Mn	No endurecible por envejecimiento
4xxx	Al-Si y Al-Mg-Si	Endurecible por envejecimiento si está presente el magnesio
5xxx	Al-Mg	No endurecible por envejecimiento
6xxx	Al-Mg-Si	Endurecible por envejecimiento
7xxx	Al-Mg-Zn	Endurecible por envejecimiento
8xxx	Al-Li, Sn, Zr, o B	Endurecible por envejecimiento
9xxx	No utilizado actualmente	

Aleaciones para fundición:

1xx.x. ^b	Aluminio comercialmente puro	No endurecible por envejecimiento
2xx.x.	Al-Cu	Endurecible por envejecimiento
3xx.x.	Al-Si-Cu o Al-Mg-Si	Algunos son endurecibles por envejecimiento
4xx.x.	Al-Si	No endurecibles por envejecimiento
5xx.x.	Al-Mg	No endurecibles por envejecimiento
7xx.x.	Al-Mg-Zn	Endurecible por envejecimiento
8xx.x.	Al-Sn	Endurecible por envejecimiento
9xx.x.	No utilizado actualmente	

^a El primer dígito muestra el primer elemento de aleación, el segundo se refiere a la modificación y los últimos dos dígitos indican el porcentaje decimal de la concentración de Al (por ejemplo, 1060 será una aleación con 99.6 de Al).

^b El último dígito indica la forma de producto, 1 o 2 es en lingote (dependiendo de la pureza) y cero es para fundición.

atomizado para que el trasbordador espacial alcance una velocidad de cerca de ~3000 millas por hora (aproximadamente 5000 km por hora). Algunos desarrollos nuevos relacionados con el aluminio incluyen el desarrollo de aleaciones de aluminio con concentraciones mayores de Mg para usarlas en la fabricación de automóviles. También hay interés en el desarrollo de procesos que transformen el Al fundido en láminas y otros productos sólidos.

Designación Las aleaciones de aluminio pueden dividirse en dos grupos principales: aleaciones para forja y aleaciones para fundición, dependiendo de su método de fabricación. Las **aleaciones para forja**, a las cuales se les da forma mediante deformación plástica, tienen composiciones y microestructuras significativamente distintas a las aleaciones para fundición, lo que refleja los diferentes requerimientos del proceso de manufactura. Dentro de cada grupo podemos dividir las aleaciones en dos subgrupos: las tratables térmicamente y las no tratables térmicamente.

Las aleaciones de aluminio se designan siguiendo el sistema que aparece en la tabla 13-3. El primer número define los principales elementos de la aleación; los números restantes se refieren a la composición específica de la aleación.

El grado de endurecimiento queda definido mediante la **designación de temple** T o H, dependiendo de que la aleación sea tratada térmicamente o endurecida por deformación (tabla 13-4). Otras designaciones indican si la aleación está recocida (O), tratada por solución (W) o utilizada tal y como fue fabricada (F). Los números que siguen a la T o a la H indican la cantidad de endurecimiento por deformación, el tipo exacto de tratamiento térmico u otros aspectos del procesamiento de la aleación. En la tabla 13-5 aparecen incluidas aleaciones comunes y sus propiedades.

Aleaciones para forja Las aleaciones para forja 1xxx, 3xxx, 5xxx y la mayoría de las 4xxx no son endurecibles por envejecimiento. Las aleaciones 1xxx y 3xxx son monofásicas, a excepción de la presencia de pequeñas cantidades de inclusiones o de compuestos intermetálicos (Fig. 13-2). Sus propiedades son controladas por endurecimiento por deformación,

TABLA 13-4 ■ Designaciones de temple para aleaciones de aluminio

F	Tal y como fue fabricada (trabajo en caliente, forjada, fundida, etc.)
O	Recocida (en el estado más blando posible)
H	Trabajada en frío
H1x	Sólo trabajada en frío (la x se refiere a la cantidad de trabajo en frío y de endurecimiento).
H12	Trabajo en frío que da una resistencia a la tensión intermedia entre los temples O y H14.
H14	Trabajo en frío que da una resistencia a la tensión intermedia entre los temples O y H18.
H16	Trabajo en frío que da una resistencia a la tensión intermedia entre los temples H14 y H18.
H18	Trabajo en frío que da una reducción de aproximadamente 75%.
H19	Trabajo en frío que da una resistencia a la tensión mayor de 2000 psi respecto a la obtenida con el temple H18.
H2x	Trabajado en frío y parcialmente recocido.
H3x	Trabajado en frío y estabilizado a una temperatura baja para evitar endurecimiento por envejecimiento de la estructura.
W	Tratada por solución
T	Endurecida por envejecimiento
T1	Enfriada desde la temperatura de fabricación y envejecida naturalmente.
T2	Enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y envejecida naturalmente.
T3	Tratada por solución, trabajada en frío y envejecida naturalmente.
T4	Tratada por solución y envejecida naturalmente.
T5	Enfriada desde la temperatura de fabricación y envejecida artificialmente.
T6	Tratada por solución y envejecida artificialmente.
T7	Tratada por solución y estabilizada por sobre-envejecimiento.
T8	Tratada por solución, trabajada en frío y envejecida artificialmente.
T9	Tratada por solución, envejecida artificialmente y trabajada en frío.
T10	Enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y envejecida artificialmente.

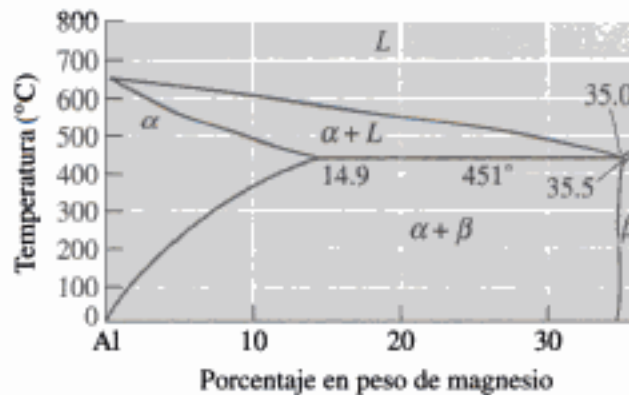


Figura 13-3
Porción del diagrama de fases
aluminio-magnesio.

endurecimiento por solución sólida y control del tamaño del grano. Sin embargo, debido a que a la temperatura ambiente la solubilidad de los elementos de aleación en el aluminio es pequeña, el grado de endurecimiento por solución sólida resulta limitada. Las aleaciones 5xxx contienen dos fases a la temperatura ambiente, α , que es una solución sólida de magnesio en el aluminio y Mg_2Al_3 , un compuesto intermetálico duro y frágil (Fig. 13-3). Las aleaciones aluminio-magnesio se endurecen mediante una dispersión fina del Mg_2Al_3 , así como por endurecimiento por deformación, por solución sólida y por control del tamaño del grano.[5] Sin embargo, debido a que el Mg_2Al_3 no es coherente, no son aplicables los tratamientos térmicos de endurecimiento por envejecimiento. Las aleaciones de la serie 4xxx también contienen dos fases, α y silicio prácticamente puro, β (capítulo 10). Las aleaciones que contienen silicio y magnesio se pueden endurecer por envejecimiento si se permite la precipitación del Mg_2Si . Las aleaciones de las series 2xxx, 6xxx y 7xxx son aleaciones endurecibles por envejecimiento. Aunque para estas aleaciones se obtienen resistencias específicas excelentes, la cantidad de precipitados que se puede formar es limitada. Además, en su condición envejecida no es posible utilizarlas a temperaturas superiores a aproximadamente 175 °C. La aleación 2024 es la de más amplio uso en aeronaves.[1] También existe interés en el desarrollo de las aleaciones Al-Li endurecidas por precipitación en razón de su elevado módulo de Young y su baja densidad. Sin embargo, los costos elevados de procesamiento, sus propiedades anisotrópicas y una baja tenacidad a la fractura han resultado factores limitantes. Las aleaciones Al-Li se utilizan para la fabricación de los depósitos de combustible de los transbordadores espaciales.

Aleaciones para fundición Muchas de las aleaciones de aluminio comunes para fundición que aparecen en la tabla 13-5 contienen suficiente silicio para provocar una reacción eutéctica, lo que da bajos puntos de fusión, buena fluidez y una buena colabilidad para fundiciones. La **fluidez** es la capacidad del metal líquido para fluir a través de un molde sin solidificarse de manera prematura, y la **colabilidad** se refiere a la facilidad con la cual se puede lograr una fundición buena a partir de la aleación.

Las propiedades de las aleaciones aluminio-silicio se controlan mediante endurecimiento por solución sólida de la matriz de aluminio α , con endurecimiento por dispersión de la fase β y con la solidificación, lo que controla el tamaño y la forma del grano primario, así como la naturaleza del microconstituyente eutéctico. El enfriamiento rápido que se obtiene en la fundición a presión o en molde permanente (capítulo 8) incrementa la resistencia al refinar el tamaño del grano y del microconstituyente eutéctico (Fig. 13-4). El refinamiento del grano utilizando adiciones de boro y titanio, la modificación mediante el uso de sodio o estroncio para cambiar la estructura eutéctica y el endurecimiento con fósforo para refinar el silicio primario son métodos que, todos ellos, se aplican en ciertas aleaciones para mejorar la microestructura y de esa manera mejorar el grado de endurecimiento por dispersión. Muchas aleaciones contienen también cobre, magnesio o zinc, lo que permite el endurecimiento por envejecimiento. Los siguientes ejemplos ilustran la aplicación de las aleaciones de aluminio.

EJEMPLO 13-4 *Diseño de un proceso de fundición para ruedas*

Diseñe un proceso de fundición para producir ruedas de automóvil que sean de bajo peso y de propiedades consistentes y uniformes.

SOLUCIÓN

Muchas ruedas automotrices se fabrican mediante fundición en molde permanente de la aleación de aluminio 356. En este proceso, el aluminio líquido se introduce en un molde de hierro fundido caliente y se solidifica. A fin de asegurarse de que no se presenten rechupes por contracción se instalan mazarotas. Esto puede requerir que la rueda se diseñe para asegurar buenas características, y no para reducir su peso. La fundición debe además, enfriarse a velocidades muy dispares, lo que produce diferencias en la microestructura, como en los espaciamentos de los brazos dendríticos secundarios y en las propiedades a través de la rueda.

Un proceso alternativo podría ser el **tixovaciado**, en el cual el material se agita durante la solidificación, lo que produce una estructura parcialmente líquida y parcialmente sólida que se comporta como un sólido cuando no se le aplica ninguna fuerza externa y, a pesar de lo anterior, fluye como un líquido bajo presión. Seleccionaríamos una aleación con un rango de solidificación amplio, de manera que una porción importante de este proceso ocurriera por crecimiento de dendritas. Una aleación aluminio-silicio hipoeutéctica puede resultar apropiada. En el proceso de tixovaciado, las dendritas se disgregan por agitación durante la solidificación. Posteriormente, el lingote se vuelve a calentar para causar sólo la fundición de la porción eutéctica de la aleación, y a continuación se introduce a presión en su estado semisólido a una temperatura por debajo de la temperatura líquida. Cuando la aleación se solidifique de nuevo, la fase primaria de aluminio será uniforme, es decir, con granos redondos (en vez de dendritas) rodeados por una matriz continua de eutéctico. Dado que en el momento de la inyección aproximadamente la mitad de la aleación está ya en estado sólido, la contracción total es pequeña, lo que reduce la posibilidad de defectos internos. Este resultado también disminuye la necesidad de mazarotas, lo que a su vez da mayor libertad para el diseño de la rueda en relación con su función y no en relación con su facilidad de fabricación.

13-2 Aleaciones de magnesio y de berilio

El magnesio, que a menudo se extrae electrolíticamente del cloruro de magnesio concentrado en el agua de mar, es más ligero que el aluminio con una densidad de 1.74 g/cm^3 y se funde a una temperatura ligeramente inferior que el aluminio.[3] En muchos entornos, la resistencia a la corrosión del magnesio se aproxima a la del aluminio; sin embargo, la exposición a ambientes salinos, como los próximos al mar, causa un rápido deterioro. Aunque las aleaciones de magnesio no son tan resistentes como las de aluminio, sus resistencias específicas son comparables. En consecuencia, las aleaciones de magnesio se utilizan en aplicaciones aeroespaciales, en maquinaria de alta velocidad y en equipo de manejo y de transporte de materiales.

Sin embargo, el magnesio tiene un bajo módulo de elasticidad ($6.5 \times 10^6 \text{ psi}$) y una inadecuada resistencia a la fatiga, a la termofluencia y al desgaste. El magnesio también representa un riesgo durante la fundición y el maquinado, ya que se combina con facilidad con el oxígeno y se quema. Finalmente, la respuesta del magnesio a los diferentes mecanismos de endurecimiento es relativamente mala.

TABLA 13-7 ■ Propiedades de aleaciones de cobre comunes obtenidas mediante diferentes mecanismos de endurecimiento

Material	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia a la cedencia (psi)	% de alargamiento	Mecanismo de endurecimiento
Cu puro, recocido	30 300	4 800	60	Ninguno
Cu comercialmente puro, recocido a un tamaño de grano grueso	32 000	10 000	55	Solución sólida
Cu comercialmente puro, recocido a un tamaño de grano fino	34 000	11 000	55	Tamaño de grano
Cu comercialmente puro, trabajado en frío 70%	57 000	53 000	4	Endurecimiento por deformación
Cu-35% Zn recocido	47 000	15 000	62	Solución sólida
Cu-10% Sn recocido	66 000	28 000	68	Solución sólida
Cu-35% Zn trabajado en frío	98 000	63 000	3	Solución sólida + endurecimiento por deformación
Cu-2% Be envejecido	190 000	175 000	4	Endurecimiento por envejecimiento
Cu-Al templado y revenido	110 000	60 000	5	Reacción martensítica
Bronce al manganeso fundido	71 000	28 000	30	Reacción eutectoide

Los cobres con menos de 1% de impurezas se utilizan para aplicaciones eléctricas y microeléctricas. Pequeñas cantidades de cadmio, plata y Al_2O_3 mejoran su dureza sin perjudicar de manera significativa su conductividad. Las aleaciones de cobre monofásicas se endurecen por trabajo en frío. En la tabla 13-7 se muestran ejemplos de este efecto. El cobre FCC tiene una ductilidad excelente y un coeficiente de endurecimiento por deformación alto.

Aleaciones endurecidas por solución sólida Varias aleaciones base cobre contienen grandes cantidades de elementos de aleación y, a pesar de ello, siguen siendo monofásicas. En la figura 13-6 se muestran diagramas de fases binarios de importancia. Las aleaciones de cobre-zinc, base de los **latones**, con menos de 40% Zn forman soluciones sólidas monofásicas de zinc en cobre. Las propiedades mecánicas, incluso el alargamiento, aumentan al incrementarse el contenido de zinc. Estas aleaciones se pueden trabajar en frío para obtener componentes bastante complicados y al mismo tiempo resistentes a la corrosión. Los **bronces** se consideran generalmente como aleaciones de cobre que contienen estaño y que pueden también contener otros elementos. El bronce al manganeso es una aleación de resistencia particularmente alta que contiene manganeso así como zinc para su endurecimiento por solución sólida.

Los bronce al estaño, a menudo conocidos como bronce fosforados, pueden contener hasta un 10% Sn y son monofásicos. El diagrama de fases predice que la aleación contendrá el compuesto Cu_3Sn (ϵ). Sin embargo, la cinética de la reacción es tan lenta que podría no formarse el precipitado.

Las aleaciones que contienen menos de aproximadamente 9% Al o menos de 3% Si también son monofásicas. Estos bronce al aluminio y al silicio tienen buenas características de formado y a menudo se les escoge por su buena resistencia y excelente tenacidad.

Aleaciones endurecibles por envejecimiento Varias aleaciones base cobre exhiben respuesta al endurecimiento por envejecimiento, incluyendo el cobre-zirconio, el cobre-cromo y el cobre-berilio. Las aleaciones de cobre-berilio se utilizan debido a su alta resistencia, elevada rigidez (lo que las hace útiles como resortes y alambres delgados), y sus características de no producir chispas (lo que permite su uso para herramientas que se utilizarán cerca de gases y líquidos inflamables).

13-4 Aleaciones de níquel y de cobalto

Las aleaciones de níquel y cobalto se utilizan tanto para la protección contra la corrosión como para obtener resistencia a alta temperatura, al aprovechar sus elevados puntos de fusión y sus altas resistencias. El níquel es FCC y tiene buena formabilidad; el cobalto es un metal alotrópico, con una estructura FCC por encima de 417°C y una estructura HC a temperaturas inferiores. Para obtener una resistencia excepcional al desgaste y gracias a su resistencia a los fluidos corporales humanos, se utilizan aleaciones especiales de cobalto para la fabricación de prótesis. La tabla 13-8 muestra una lista de aleaciones comunes y sus aplicaciones.

TABLA 13-8 ■ Composiciones, propiedades y aplicaciones de aleaciones de níquel y de cobalto seleccionadas

Material	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia a la cedencia (psi)	% de alargamiento	Mecanismo de endurecimiento	Aplicaciones
Ni puro (99.9% Ni)	50 000 96 000	16 000 90 000	45 4	Recocido Trabajado en frío	Resistencia a la corrosión Resistencia a la corrosión
Aleaciones Ni-Cu:					
Monel 400 (Ni-31.5% Cu)	78 000	39 000	37	Recocido	Válvulas, bombas, intercambiadores de calor
Monel K-500 (Ni-29.5% Cu-2.7% Al-0.6% Ti)	150 000	110 000	30	Envejecido	Flechas, resortes, impulsores
Superalloys Ni:					
Inconel 600 (Ni-15.5% Cr-8% Fe)	90 000	29 000	49	Carburos	Equipos de tratamiento térmico
Hastelloy B-2 (Ni-28% Mo)	130 000	60 000	61	Carburos	Resistencia a la corrosión
DS-Ni (Ni-2% ThO ₂)	71 000	48 000	14	Dispersión	Turbinas de gas
Superalloys Fe-Ni:					
Incoloy 800 (Ni-46% Fe-21% Cr)	89 000	41 000	37	Carburos	Intercambiadores de calor
Superalloys Co:					
Estelita 6B (60% Co-30% Cr-4.5% W)	177 000	103 000	4	Carburos	Resistencia al desgaste abrasivo

En el capítulo 8, vimos la velocidad con que se pueden formar los polvos solidificados de superaleaciones basadas en níquel y cobalto, usando atomización por rociado seguido por una compresión isostática caliente. Estos materiales se utilizan para fabricar los núcleos que sujetan los álabes de las turbinas, así como los álabes de turbina utilizadas por los motores de las aeronaves.[9] En el capítulo 9 vimos aplicaciones de aleaciones con memoria de forma basadas en Ni-Ti.[10] El hierro, el níquel y el cobalto son magnéticos. Ciertas aleaciones basadas en Fe-Ni y Fe-Co forman materiales magnéticos de muy buena calidad (capítulo 9).[11,12] Una aleación de Ni-36% Fe (Invar) presenta una dilatación prácticamente nula durante su calentamiento; este efecto se aprovecha en la producción de materiales compuestos bimetálicos. El cobalto es utilizado en herramientas de corte WC-Co.

Níquel y moneles El níquel y sus aleaciones tienen una excelente resistencia a la corrosión y buenas características de formado. Cuando se le agrega cobre al níquel, se obtiene la resistencia máxima cerca de 60% Ni. Varias aleaciones, conocidas como moneles, que tienen aproximadamente esta composición se utilizan en agua salada y a temperaturas elevadas por su fuerza y su resistencia a la corrosión. Algunos de los moneles contienen pequeñas cantidades de aluminio y titanio. Estas aleaciones son susceptibles al endurecimiento por envejecimiento gracias a la precipitación de γ' , un precipitado coherente de Ni₃Al o Ni₃Ti que prácticamente

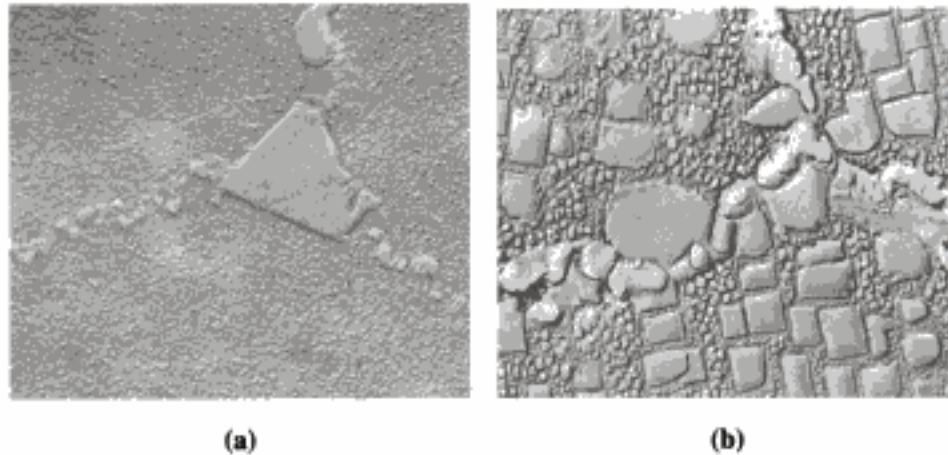


Figura 13-8 (a) Microestructura de una superaleación, con carburos en los límites de grano y precipitados γ' en la matriz (15 000 $\times$). (b) Microestructura de una superaleación envejecida a dos temperaturas que produce a la vez precipitados γ' cúbicos grandes y pequeños (10 000 $\times$). (ASM Handbook, vol. 9, *Metallography y Microstructure* (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073).

superficial y minimiza el sobre-envejecimiento de las aleaciones, dando una buena resistencia mecánica a la termofluencia incluso a altas temperaturas.

Al variar la temperatura de envejecimiento se pueden producir precipitados de varios tamaños. Los precipitados pequeños, que se forman a temperaturas de envejecimiento bajas, pueden crecer entre los precipitados más grandes producidos a temperaturas más altas, incrementando así el porcentaje volumétrico de γ' y, por lo mismo, incrementando la resistencia [Fig. 13-8(b)].

El uso a alta temperatura de las superaleaciones puede mejorarse si se utiliza un recubrimiento o un material cerámico. Un método para ello es recubrir primero la superaleación con una capa de adhesión metálica compuesta de una aleación compleja NiCoCrAlY, y después aplicar un recubrimiento exterior, que actúe como barrera térmica, hecho de un material cerámico ZrO_2 estabilizado (Fig. 5-5). Este recubrimiento ayuda a reducir la oxidación de la superaleación y permite que los motores a reacción operen a temperaturas más altas con mayor eficiencia. El siguiente ejemplo muestra la aplicación de una superaleación base níquel.

EJEMPLO 13-7

Diseño y selección de materiales para los álabes de la turbina de un motor de propulsión a chorro de alto rendimiento

Diseñe una superaleación base níquel a fin de producir los álabes de una turbina de gas para un motor de avión que tengan un tiempo de ruptura por termofluencia particularmente largo a temperaturas cercanas a 1100 °C.

SOLUCIÓN

En primer término es necesario tener una microestructura muy estable. La adición de aluminio o titanio permite la precipitación de hasta un 60% en volumen de la fase γ' durante el tratamiento térmico y podría permitir que la aleación opere a temperaturas que se acercan a 0.85 veces la temperatura de fusión absoluta. La adición de carbono y elementos de aleación, tales como el Ta y el Hf, permite la precipitación de carburos aleados que impiden que los límites de grano se deslicen a altas temperaturas. Otros elementos de aleación, incluyendo el molibdeno y el tungsteno, permiten el endurecimiento por solución sólida.

A continuación se dará un tratamiento térmico a la fundición para asegurar que los carburos y γ' se precipiten con el tamaño y la distribución correctas. Se podrían utilizar temperaturas de envejecimiento múltiples, a fin de lograr la formación del mayor volumen porcentual de γ' posible.

Finalmente, el álabe podría contener varios pequeños canales de enfriamiento a todo su largo. El aire de la combustión del motor puede pasar por estos canales, proporcionando un enfriamiento activo al aspa, antes de reaccionar con el combustible en la cámara de combustión. La figura 13-9 muestra la mejoría que se puede obtener en el rendimiento utilizando estos métodos de diseño.

13-5 Aleaciones de titanio

El titanio se produce partiendo del TiO_2 utilizando el proceso Kroll. El TiO_2 se convierte en TiCl_4 (tetracloruro de titanio, también conocido de manera informal como "ticle"), que después es reducido a titanio por medio de sodio o magnesio. A continuación, el titanio esponja resultante se consolida, se alea según se necesite y se procesa utilizando fundición de arco eléctrico al vacío. Recientemente, se ha informado de un nuevo proceso para la producción de titanio esponja directamente a partir del TiO_2 . [13] El titanio ofrece una excelente resistencia a la corrosión, una elevada resistencia específica y buenas propiedades a altas temperaturas. Resistencias de hasta 200 000 psi, junto con una densidad de 4.505 g/cm³, aportan excelentes propiedades mecánicas. Una película protectora adherente de TiO_2 proporciona una importante resistencia a la corrosión y a la contaminación por debajo de 535 °C. Por encima de esta temperatura, la película de óxido se desintegra y pequeños átomos como los del carbono, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno fragilizan el titanio.

La excelente resistencia a la corrosión del titanio permite aplicaciones en equipo de procesamiento químico, componentes marinos e implantes biomédicos tales como las prótesis de cadera. El titanio es un material aeroespacial importante que encuentra aplicación en fuselajes y componentes del motor a reacción. Cuando se le combina con niobio, se forma un compuesto intermetálico superconductor; cuando se le combina con aluminio, se produce una nueva clase de aleaciones intermetálicas, como se vio en el capítulo 10. Las aleaciones de titanio se utilizan en equipo deportivo, como en las masas de los palos de golf.

El titanio es alotrópico con una estructura cristalina HC (α) a bajas temperaturas y con una estructura BCC (β) por encima de 882 °C. Los elementos de aleación le aportan endurecimiento por solución sólida y modifican su temperatura de transformación alotrópica. Los elementos de aleación se pueden dividir en cuatro grupos (Fig. 13-10). Adiciones tales como estaño y zirconio proporcionan endurecimiento por solución sólida sin afectar la temperatura de transformación. El aluminio, oxígeno, hidrógeno y otros elementos estabilizadores de la fase alfa incrementa la temperatura a la cual α se transforma en β . Estabilizadores de la fase beta, como, por ejemplo, el vanadio, el tantalio, el molibdeno y el niobio disminuyen la temperatura de transformación, haciendo incluso que β sea estable a temperatura ambiente. Finalmente, el manganeso, el cromo y el hierro producen una reacción eutécticoide, reduciendo la temperatura a la cual ocurre la transformación α - β y produciendo a la temperatura ambiente una estructura de dos fases. La tabla 13-9 presenta una lista de varias clases de titanio y de sus aleaciones.

Titanio comercialmente puro El titanio sin alea se utiliza para aprovechar su resistencia a la corrosión superior. Las impurezas como el oxígeno aumentan la resistencia del titanio (Fig. 13-11), pero reduce su resistencia a la corrosión. Las aplicaciones incluyen intercambiadores de calor, tuberías, reactores, bombas y válvulas para las industrias química y petroquímica.

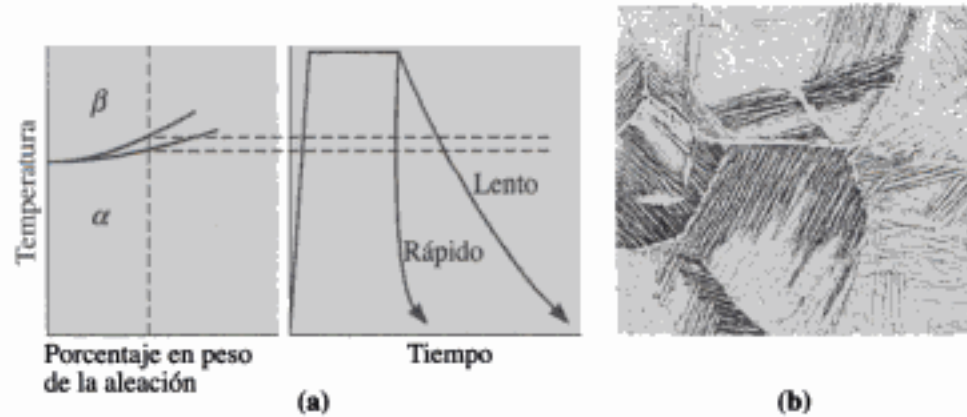


Figura 13-12 (a) Recocido y (b) microestructura de titanio alfa enfriado rápidamente (100 $\times$). Tanto el precipitado de los límites de grano como las placas Widmanstätten son alfa. (De *ASM Handbook*, vol. 7, (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073.)

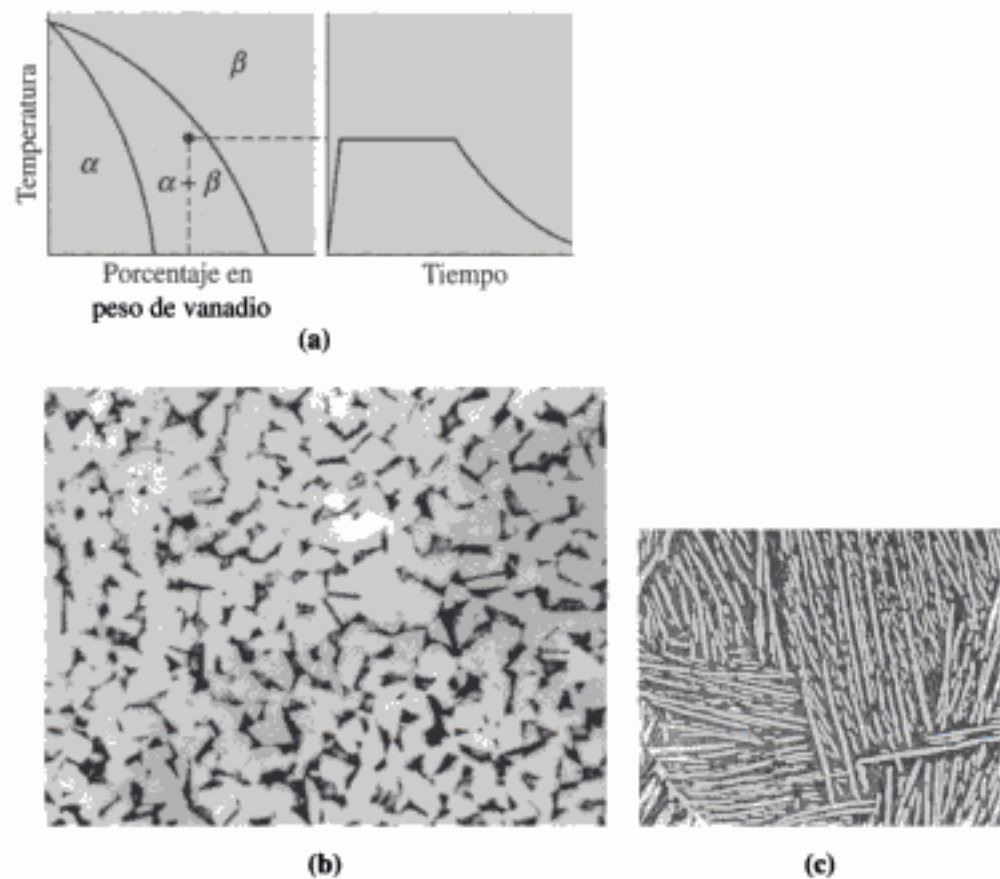


Figura 13-13 Recocido de una aleación de titanio alfa-beta. (a) El recocido se efectúa justo por debajo de la temperatura de transformación α - β , (b) un enfriamiento lento logra granos α equiaxiales (250 $\times$) y (c) un enfriamiento rápido forma granos α aciculares (2500 $\times$). (De *ASM Handbook*, vol. 7, (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073.)

El recocido logra una combinación de ductilidad alta, propiedades uniformes y una buena resistencia mecánica. La aleación se calienta justo por debajo de la temperatura de transición β , lo que permite que quede una pequeña cantidad de α lo que previene crecimiento de grano (Fig. 13-13). Un enfriamiento lento causa la formación de granos α equiaxiales; esta estructura equiaxial proporciona una buena ductilidad, formabilidad y, al mismo tiempo, dificulta la nucleación de grietas por fatiga. Un enfriamiento más rápido, particularmente partiendo de una temperatura de transición por arriba de α - β , produce una fase α acicular o en "tejido de canasta" (Fig. 13-13). Aunque en esta estructura pueden nuclearse más fácilmente grietas por fatiga, éstas deben seguir una trayectoria tortuosa a lo largo de las fronteras entre α y β . Esta situación da como resultado una lenta velocidad de crecimiento de grietas por fatiga, una buena tenacidad a la fractura y una buena resistencia a la termofluencia.

Cuando la fase β se temple desde una temperatura alta, se pueden producir dos tipos de microestructuras posibles. El diagrama de fases de la figura 13-14 incluye una línea punteada que representa el inicio de la martensita, misma que sirve de base de un tratamiento de templeado y de revenido. La fase β se transforma a martensita de titanio (α') en alguna aleación que cruce en enfriamiento la línea M_s . La martensita de titanio es una fase sobresaturada relativamente blanda. Cuando se recalienta α' , ocurre un revenido por precipitación de β a partir de α' sobresaturada:

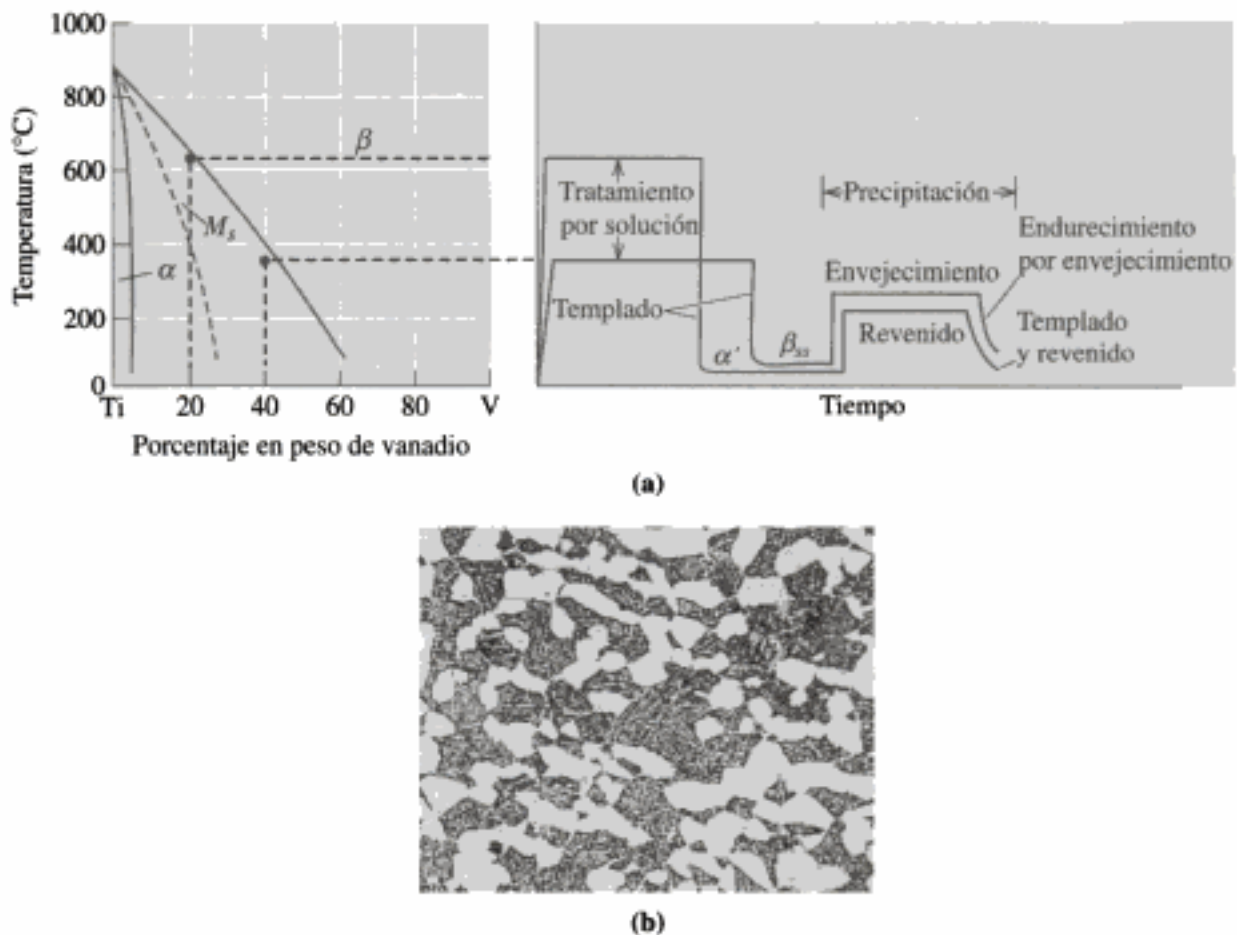
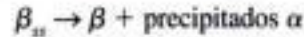


Figura 13-14 (a) Tratamiento térmico y (b) microestructura de las aleaciones de titanio alfa-beta. La estructura contiene α primaria (granos blancos grandes) en una matriz de β oscura con agujas de α formadas durante el envejecimiento (250 $\times$). (De *ASM Handbook*, vol. 7, (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073.)



Inicialmente, los precipitados β finos incrementan la resistencia mecánica en comparación con α' , lo opuesto a lo que se logra al revenir una martensita de acero. Sin embargo, ocurre un reblandecimiento cuando el revenido se lleva a cabo a una temperatura demasiado alta.

Las composiciones α - β más aleadas se endurecen por envejecimiento. Cuando en estas aleaciones se temple β , produciendo β_{ss} , fase sobresaturada en titanio. Cuando β_{ss} se envejece, α se precipita en una estructura Widmanstätten, figura 13-14:



La formación de esta estructura conduce a una resistencia mecánica y tenacidad a la fractura mejoradas. Los componentes para fuselajes, cohetes, motores a reacción y equipo de aterrizaje son aplicaciones comunes para las aleaciones alfa-beta tratadas térmicamente. Algunas aleaciones, incluyendo la aleación Ti-6% Al-4% V son superplásticas y es posible deformarlas hasta en más de 1000%. Esta aleación también se utiliza para manufacturar prótesis para el cuerpo humano (véase la fotografía al principio de este capítulo). Las aleaciones de titanio se consideran **biocompatibles** (es decir, no son rechazadas por el cuerpo humano). Mediante el desarrollo de recubrimientos porosos de composiciones cerámicas similares a los huesos, conocidos como hidroxiapatita, es posible hacer que las prótesis de titanio sean **bioactivas** (es decir, el hueso natural puede crecer sobre el recubrimiento hidroxiapatita). Los siguientes tres ejemplos ilustran aplicaciones de aleaciones de titanio.

EJEMPLO 13-8 Diseño de un intercambiador de calor

Diseñe un intercambiador de calor de 5 pies de diámetro y 30 pies de largo para la industria petroquímica (Fig. 13-15).



Figura 13-15
Esquema de un intercambiador de calor con tubos de titanio (para el ejemplo 13-8).

SOLUCIÓN

El intercambiador de calor debe cumplir con varios criterios de diseño. Debe tener una buena resistencia a la corrosión para manejar productos agresivos de la refinación química; debe operar a temperaturas relativamente altas; debe conformarse fácilmente en láminas y los tubos a partir de los cuales se fabricará el intercambiador y debe tener una buena soldabilidad para unir los tubos con el cuerpo del intercambiador.

Siempre y cuando la temperatura máxima de operación se mantenga por debajo de 535 °C para que se mantenga la película de óxido estable, el titanio puede ser una buena elección para proporcionar resistencia a la corrosión a temperaturas elevadas. Un titanio comercialmente puro cumple con la mejor resistencia a la corrosión.

El titanio puro también proporciona características superiores para el formado plástico y soldadura y sería, por tanto, nuestra selección más lógica. Si el titanio puro no tiene la resistencia suficiente, una alternativa sería una aleación alfa de titanio, que seguirá dando una buena resistencia a la corrosión, buenas características de formado y de soldabilidad y, además una resistencia ligeramente mejorada.

EJEMPLO 13-9 *Diseño de una biela*

Diseñe una biela de alto rendimiento para el motor de un automóvil de carreras (Fig. 13-16).



Figura 13-16
Esquema de biela (para el ejemplo 13-9).

SOLUCIÓN

Un motor de alto rendimiento para carreras requiere materiales que puedan operar a temperaturas y esfuerzos elevados minimizando al mismo tiempo el peso del motor. En los automóviles normales, a menudo las bielas se fabrican de acero forjado o de un hierro fundido maleable. Podríamos ahorrar un peso considerable al reemplazar estas piezas por titanio. Para lograr resistencias elevadas, podríamos considerar una aleación de titanio alfa-beta. Debido a su disponibilidad, una buena elección sería la aleación Ti-6% Al-4% V. Esta aleación se calienta a aproximadamente 1065 °C, que es la porción totalmente β del diagrama de fases. Al templearla se forma martensita de titanio; el revenido subsiguiente produce una microestructura con precipitados beta dentro de una matriz alfa.

Cuando el tratamiento térmico se efectúa dentro de la región de β , la martensita revenida tiene una estructura acicular, lo que reduce la velocidad de crecimiento de cualquier grieta por fatiga que pudiera llegar a aparecer.

EJEMPLO 13-10 *Materiales para una prótesis de cadera*

¿Qué tipo de material seleccionaría usted para una prótesis que se utilizará en un reemplazo total de cadera?

SOLUCIÓN

Una prótesis de cadera debe reemplazar una parte del hueso del fémur que está desgastado o dañado. La prótesis tiene una cabeza metálica y se ajusta en la cavidad del fémur. Es necesario tomar en consideración los factores siguientes: biocompatibilidad, resistencia a la corrosión, tenacidad a la fractura elevada, una excelente vida a la fatiga (con la finalidad de que la prótesis dure muchos años, ya que es difícil llevar a cabo la cirugía conforme los pacientes envejecen), así como resistencia al desgaste. También es necesario considerar la rigidez. Si la aleación es demasiado rígida en comparación con el hueso, la mayor parte del esfuerzo será soportado por la prótesis. Esto lleva a un debilitamiento del hueso restante y a su vez puede aflojar la prótesis. Por tanto, necesitamos un material con una elevada resistencia a la tensión, con resistencia a la corrosión, con biocompatibilidad y tenacidad a la fractura. Estos requisitos sugieren el acero inoxidable 316 o Ti-6% Al-4% V. Ninguno de estos materiales es ferromagnético y ambos son opacos para los rayos X. Esto es deseable para imágenes por resonancia magnética y por rayos X. Las aleaciones de titanio no son muy duras y se pueden desgastar. Los aceros inoxidables son más duros, pero son mucho más rígidos que el hueso. El titanio es biocompatible y resultaría una mejor elección. Quizás una

respuesta podría ser un material compuesto en el cual el vástago estuviera fabricado de una aleación Ti-6% Al-4% V y con una cabeza fabricada de un material cerámico resistente al desgaste, resistente a la corrosión y tenaz a la fractura, como podría ser la alúmina. El interior del receptáculo podría ser fabricado de un polietileno de densidad ultraalta (peso molecular ultraalto), que tiene un coeficiente de fricción muy bajo. La superficie de la prótesis se puede hacer porosa, a fin de estimular el crecimiento del hueso. Otra opción sería recubrir la prótesis con un material como la hidroxiapatita porosa para alentar el crecimiento del hueso. En la fotografía del principio de este capítulo, se muestra una prótesis de titanio.

13-6 Metales refractarios y preciosos

Los metales refractarios, es decir el tungsteno, molibdeno, tantalio y niobio (o colombio), tienen temperaturas de fusión excepcionalmente altas (por arriba de 1925 °C) y, en consecuencia, tienen la capacidad potencial para el servicio a alta temperatura. Entre sus aplicaciones se incluyen los filamentos para los focos de luz, toberas de reactores, generadores de energía nuclear, capacitores electrónicos basados en tantalio y niobio y equipo para procesamientos químicos. Sin embargo, los metales tienen una elevada densidad, lo que limita sus resistencias específicas (tabla 13-10).

TABLA 13-10 ■ Propiedades de algunos metales refractarios

Metal	Temperatura de fusión (°C)	Densidad (g/cm ³)	T = 1000°C		Temperatura de transición (°C)
			Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia de cedencia (psi)	
Nb	2468	8.57	17 000	8 000	-140
Mo	2610	10.22	50 000	30 000	30
Ta	2996	16.6	27 000	24 000	-270
W	3410	19.25	66 000	15 000	300

Oxidación Los metales refractarios empiezan a oxidarse entre 200 y 425 °C y rápidamente se contaminan y fragilizan. En consecuencia, se deben tomar precauciones especiales durante la fundición, el trabajo en caliente, la soldadura o en la metalurgia de polvos. Los metales, además, deben protegerse durante su servicio a altas temperaturas. Por ejemplo el filamento de tungsteno de un foco de luz está protegido por el vacío.

Para ciertas aplicaciones, los metales pueden estar recubiertos con una capa de siliciuro o aluminuro. El recubrimiento debe a) tener una temperatura de fusión elevada, b) ser compatible con el metal refractario, c) actuar como una barrera a la difusión para evitar que los contaminantes lleguen hasta el metal subyacente y d) tener un coeficiente de dilatación térmica similar al del metal refractario. Existen recubrimientos disponibles que protegen el metal hasta aproximadamente 1650 °C. En algunas aplicaciones, como es en capacitores para teléfonos celulares, la formación de óxidos resulta útil, ya que deseamos aprovechar dicho óxido como un material no conductor (capítulo 18).

Características de formado Los metales refractarios, que tienen una estructura cristalina BCC, presentan una temperatura de transición de dúctil a frágil. Dado que las temperaturas de transición del niobio y del tantalio son inferiores a la temperatura ambiente, estos dos metales

GLOSARIO

- Aleación no ferrosa** Aleación basada en un metal distinto al hierro.
- Aleaciones para forja** Aleaciones que se conforman mediante un proceso de deformación.
- Bioactivo** Material que no es rechazado por el cuerpo humano y que finalmente llega a formar parte del mismo (hidroxiapatita).
- Biocompatible** Material que no es rechazado por el cuerpo humano.
- Bronce** Generalmente aleaciones de cobre que contienen estaño, aunque pueden contener, además, otros elementos.
- Cobre blíster** Una forma impura del cobre que se obtiene durante el proceso de refinación del mismo.
- Colabilidad** Facilidad con la cual se puede vaciar un metal en un molde para hacer una pieza fundida sin producir defectos o sin requerir técnicas no usuales o costosas, para evitar problemas de fundición.
- Designación de temple** Notación abreviada que utiliza letras y números para identificar el procesamiento de una aleación. La designación con H se refiere a aleaciones trabajadas en frío; la designación con T, a tratamientos de endurecimiento por envejecimiento.
- Fluidez** Capacidad de un metal líquido para llenar la cavidad de un molde, sin solidificarse de manera prematura.
- Latón** Un grupo de aleaciones basadas en el cobre que, por lo general, contienen zinc como elemento principal de aleación.
- Metales refractarios** Metales que tienen una temperatura de fusión por arriba de 1925 °C.
- Monel** La aleación de cobre y níquel que contiene aproximadamente 60% Ni y que logra la resistencia máxima en el sistema de aleación binario.
- Proceso Hall-Heroult** Proceso electrolítico mediante el cual se extrae el aluminio de su mineral.
- Resistencia específica** Relación de la resistencia a la densidad, también conocida como relación resistencia a peso.
- Superalaciones** Grupo de aleaciones basadas en níquel, hierro-níquel y cobalto con una resistencia térmica, a la termofluencia y a la corrosión excepcionales.
- Tixovaciado** Proceso mediante el cual se agita un material durante su solidificación, produciendo una estructura en parte líquida y en parte sólida que se comporta como un sólido cuando no se le aplica una fuerza externa, pero que fluye como un líquido cuando está a presión.

INFORMACIÓN ADICIONAL

1. HARPER, C.A. *Handbook of Materials Product Design*, 3a. ed., McGraw Hill, 2001.
2. BINCZEWSKI. "The Point of a Monument: A history of the Aluminum Cap of the Washington Monument", *Journal of Metals*, 47 (11), 1995.
3. EVANS, J.W. y L.C. DE JONGHE. *The Production of Inorganic Materials*, Prentice Hall, 1991.
4. GAYLE, F.W. y M. GOODWAY. "Precipitation Hardening in the First Aerospace Aluminum Alloy: The Wright Flyer Crankcase", *Science*, 266(5187), 1994, pp. 1015-1017.
5. SAMPLE, V. ALCOA. *Reconocemos las discusiones técnicas*, 2002.
6. HOSFORD, W.F. y J.L. DUNCAN. "The Aluminum Beverage Can", *Scientific American*, septiembre de 1994, pp. 48-53.
7. BRONOSWIKI, J. *The Ascent of Man*, Back Bay Books, 1973, pp. 124-131.
8. DAVENPORT, W.G. et al. *Flash Smelting: Analysis, Control and Optimization*, Warrendale, PA., The Minerals, Metals & Materials Society, 2001.
9. STAITE, J., B. HANN y F. RIZZO. *Crucible Compaction Metals*, Pittsburgh, PA. *Se reconoce la asistencia técnica*, 2002.
10. OTSUKA, K. y T. KAKESHITA. "Science and Technology of Shape-Memory Alloys: New Developments", *MRS Bulletin*, 27(2), 2002.

11. BOZORTH, R.M. *Ferromagnetism*, IEEE Press, Nueva York, 1978.
12. CHEN, C.W. *Magnetism and Metallurgy of Soft Magnetic Materials*, 2a. ed., Dover Publication, 1986.
13. CHEN, G.Z., D.J. FRAY y T.W. FARTHING. *Nature*, 407, 2000, p. 361.
14. WEIDMANN, G., P. LEWIS y N. REID. *Structural Materials (Materials in Action Series)*, N. REID, ed., The Open University, Butterworth Heinemann, 1990.

✓ PROBLEMAS

- 13-1 En algunos casos, podríamos estar más interesados en el costo por unidad de volumen que en el costo por unidad de peso. Vuelva a elaborar la tabla 13-1 para mostrar el costo en función de \$/cm³. ¿Lo anterior cambia o altera la relación entre los diferentes metales?

Sección 13-1 Aleaciones de aluminio

- 13-2 Suponiendo que no se modifica la densidad, compare la resistencia específica de la aleación de aluminio 2090-T6 con la de una aleación de aluminio fundida a presión 443-F. Si se tuvo en consideración la densidad real, ¿piensa usted que las diferencias entre las resistencias específicas aumentarían o disminuirían? Explique.
- 13-3 Explique por qué no se utilizan aleaciones de aluminio con más de aproximadamente 15% Mg.
- 13-4 Explique la manera en que se convierte la alúmina en aluminio metálico utilizando el proceso Hall-Heroult.
- 13-5 ¿Cuáles son las aplicaciones principales del aluminio y de sus aleaciones?
- 13-6 Explique por qué el aluminio puede ser reciclado de manera ventajosa.
- 13-7 ¿Esperaría usted que una aleación de aluminio 2024-T9 sea más resistente o más débil que una aleación 2024-T6? Explique.
- 13-8 Estime la resistencia a la tensión que debe esperarse para las siguientes aleaciones de aluminio:
a) 1100-H14 b) 5182-H12 c) 3004-H16
- 13-9 Suponga que, mediante una solidificación rápida partiendo del estado líquido, se puede producir y después envejecer una aleación sobresaturada Al-7% Li. Compare la cantidad de β que se formará en esta aleación con la formada en una aleación 2090.
- 13-10 Determine la cantidad de Mg_2Al_3 (β) que se espera se forme en una aleación de aluminio 5182-O (véase la figura 13-5).
- 13-11 Con base en los diagramas de fases, ¿cuál de las siguientes aleaciones sería la más adecuada para el tixotariado? Explique su respuesta (véase la Fig. 13-3 y los diagramas de fase de los capítulos 10 y 11).
a) Al-12% Si a) Al-1% Cu c) Al-10% Mg

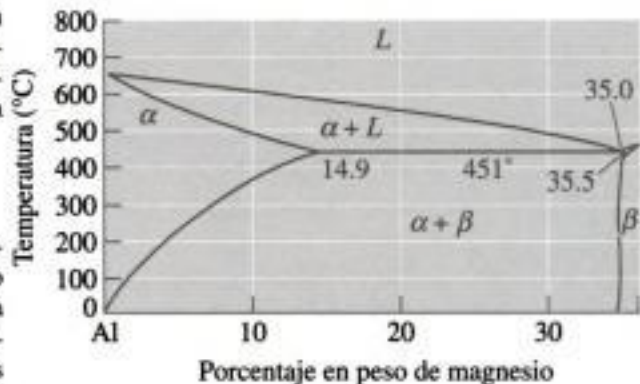


Figura 13-5 (Repetida para el problema 13-10). Diagrama de fases magnesio-aluminio.

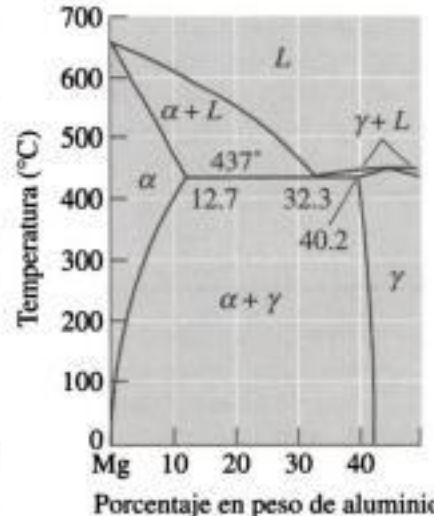


Figura 13-3 (Repetida para el problema 13-11). Porción del diagrama de fases aluminio-magnesio.

Sección 13-2 Aleaciones de magnesio y de berilio

- 13-12 A partir de los datos de la tabla 13-6, estime la relación en la cual se puede incrementar la resistencia de cedencia del magnesio mediante aleación y tratamiento térmico, y compárela con la de las aleaciones de aluminio.

13-13 Suponga que una barra redonda de 24 pulgadas de largo debe soportar una carga de 400 libras sin deformación permanente. Calcule el diámetro mínimo de la barra si está hecha de:

- a) aleación de magnesio AZ80A-T5 y
- b) aleación de aluminio 6061-T6.

Calcule en cada caso el peso de la barra y el costo aproximado. (Con base en Al y Mg puros.)

13-14 Una varilla de 0.5 cm de diámetro y 10 metros de largo no debe sufrir un alargamiento mayor de 2 mm bajo carga. Determine la fuerza máxima que puede aplicarse si la varilla esta hecha de:

- a) aluminio
- b) magnesio
- c) berilio

Sección 13-3 Aleaciones de cobre

13-15 a) Explique la forma en que se obtiene el cobre.
b) ¿Cuáles son algunas de las propiedades importantes del cobre? c) ¿Qué es el latón? d) ¿Qué es el bronce? e) ¿Por qué la Estatua de la Libertad es de color verde?

13-16 Decimos que un cobre puede contener hasta 40% Zn o 9% Al y ser monofásico. ¿Cómo explicamos lo anterior a la luz de los diagramas de fases de la figura 13-6?

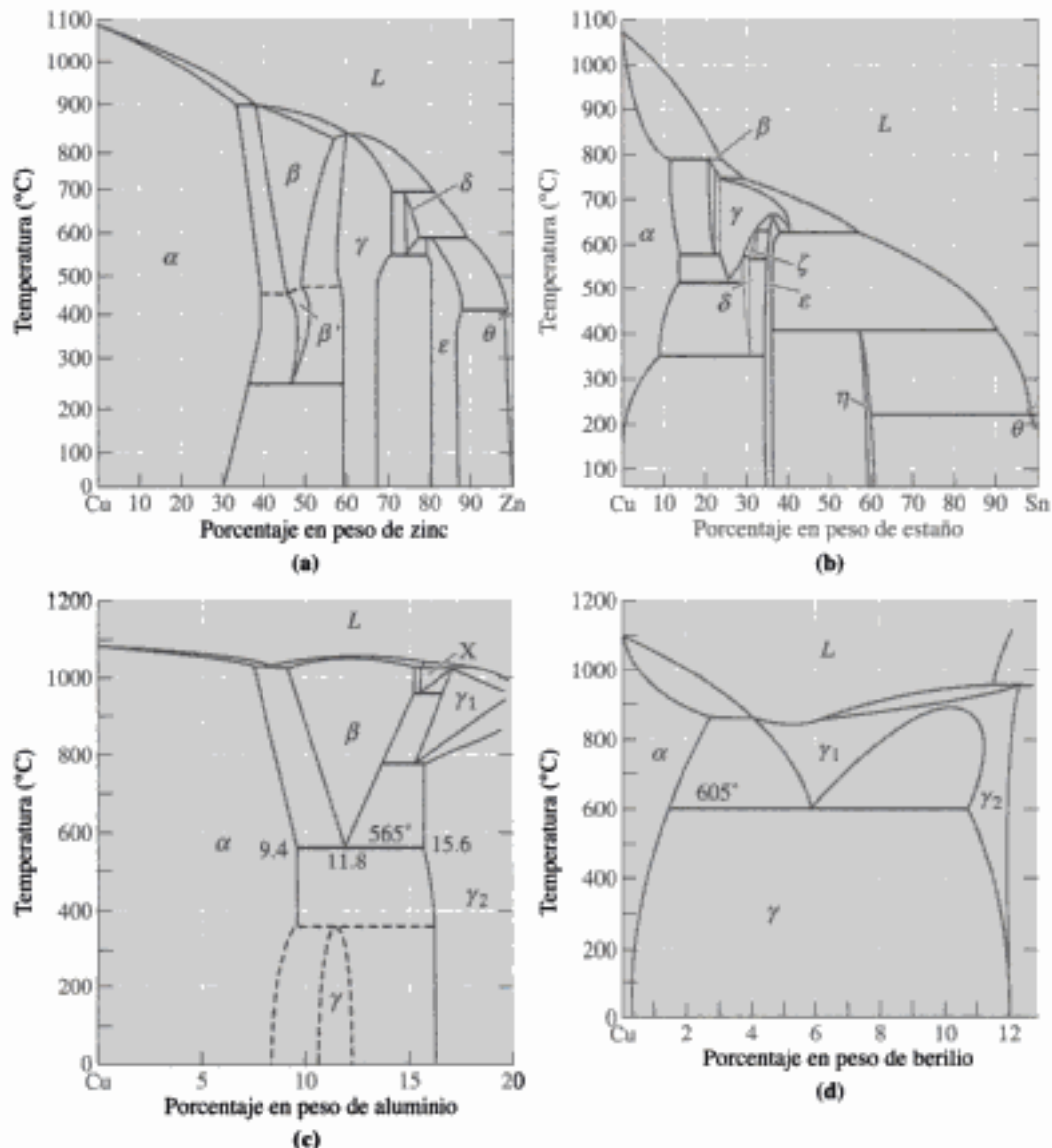


Figura 13-6 (Repetida para el problema 13-16). Diagramas de fases binarios para los sistemas (a) cobre-zinc, (b) cobre-estaño, (c) cobre-aluminio y (d) cobre-berilio.

- 13-17 Compare los incrementos porcentuales de las resistencias de cedencias del aluminio, magnesio y cobre recocidos, comercialmente puros, después de aplicarles endurecimiento por deformación. Explique las diferencias que se observen.
- 13-18 Deseáramos producir un bronce al aluminio templado y revenido que contenga 13% Al. Recomiende un tratamiento térmico, incluyendo las temperaturas apropiadas. Calcule la cantidad de cada fase después de cada uno de los pasos del tratamiento.
- 13-19 Varias aleaciones para fundición contienen cantidades elevadas de plomo; sin embargo, el contenido de Pb en las aleaciones para forja es comparativamente bajo. ¿Por qué razón no se le agrega más plomo a las aleaciones de forja? ¿Qué precauciones deben tomarse cuando una aleación para forja con plomo se trabaja en caliente o se le da un tratamiento térmico?
- 13-20 ¿Esperaría usted que la tenacidad a la fractura de un bronce al aluminio templado y revenido sea alta o baja? ¿Existe alguna diferencia en la resistencia de la aleación a la nucleación de grietas en comparación con el crecimiento de las mismas? Explique.

Sección 13-4 Aleaciones de níquel y de cobalto

- 13-21 Con base en la microfotografía de la figura 13-8(a), ¿Esperaría usted que el precipitado γ' o los carburos proporcionen un efecto de endurecimiento mayor en las superaleaciones a bajas temperaturas? Explique.
- 13-22 La densidad del Ni_3Al es de 7.5 g/cm^3 . Suponga que una aleación de Ni-5% de peso Al se trata térmicamente de modo que todo el aluminio reacciona con el níquel para producir Ni_3Al . Determine el porcentaje volumétrico del precipitado Ni_3Al en la matriz de níquel.
- 13-23 La figura 13-8(b) muestra una superaleación de níquel que contiene precipitados γ' de dos tamaños. ¿Qué precipitado posiblemente se formó pri-

mero? ¿Qué precipitado se formó a la temperatura más elevada? ¿Qué sugiere nuestra posibilidad de realizar este tratamiento en relación con el efecto de la temperatura sobre la solubilidad del Al y del Ti en el níquel? Explique.

Sección 13-5 Aleaciones de titanio

- 13-24 Cuando se une el acero mediante soldadura eléctrica, sólo debe protegerse la zona de fusión líquida con un gas o un fundente. Sin embargo, al soldar el titanio, es necesario proteger tanto los lados delantero como trasero del metal. ¿Por qué deben tomarse estas medidas adicionales al soldar el titanio?
- 13-25 Tanto la aleación Ti-15% V como la Ti-35% V se calientan a una temperatura en donde se forma totalmente β . Después se templen y se recalientan a 300°C . Describa los cambios en microestructuras ocurridos durante el tratamiento térmico de cada aleación, incluyendo las cantidades de cada fase. ¿Cuál es, en cada caso, la matriz y cuál el precipitado? ¿Cuál es un proceso de endurecimiento por envejecimiento? ¿Cuál es un proceso de temple y revenido? [Véase la Fig. 13-14(a)].
- 13-26 La fase θ en el diagrama de fases Ti-Mn tiene la fórmula MnTi . Calcule la cantidad de α y de θ en el microconstituyente eutectoide [véase la Fig. 13-10(d)].
- 13-27 ¿De qué manera se fabrica el titanio metálico? Explique los términos "biocompatible" y "bioactivo" en los materiales. ¿Cuáles serían las ventajas del uso de una aleación Ti-6% Al-4% V en aplicaciones de prótesis de cadera? ¿Cuáles serían algunas de las dificultades que se podrían presentar?
- 13-28 Determine la resistencia específica de las aleaciones más resistentes de Al, Mg, Cu, Ti y Ni. Utilice en sus cálculos las densidades de los metales puros, en lb/pulg^3 . Intente explicar su posición relativa.

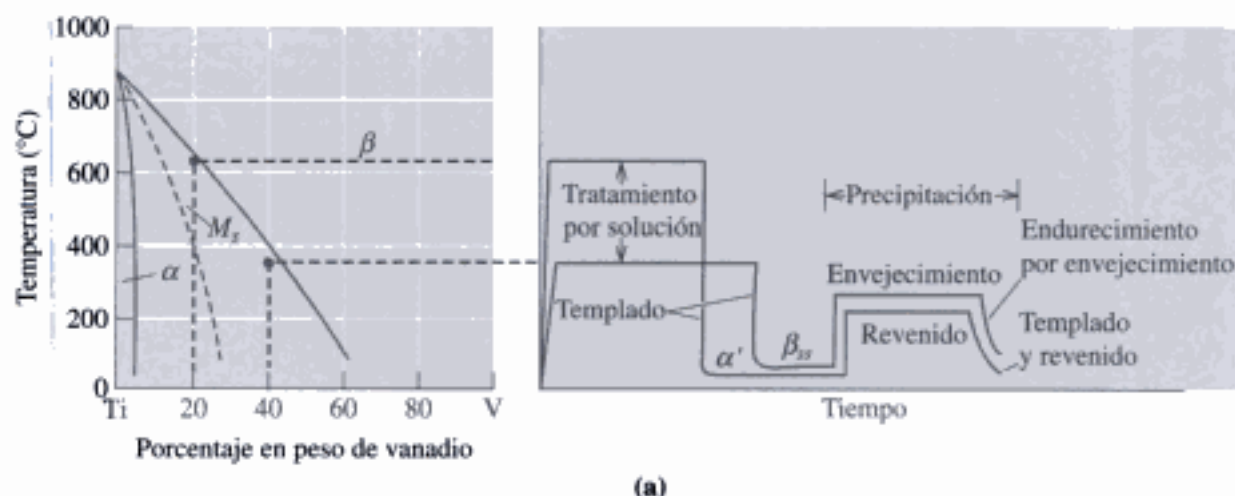


Figura 13-14 (Repetida para el problema 13-25). (a) Tratamiento térmico.

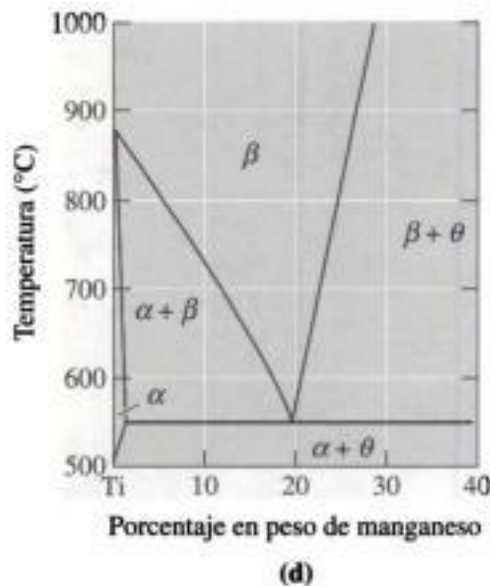


Figura 13-10 (Repetida para el problema 13-26).
(d) Titanio-manganeso.

- 13-29 Con base en los diagramas de fases, estime las solubilidades del Ni, Zn, Al, Sn y Be en el cobre a temperatura ambiente. ¿Son éstas las solubilidades esperadas en vista de las condiciones de Hume-Rothery para la solubilidad sólida? Explique.

Sección 13-6 Metales refractarios y preciosos

- 13-30 ¿Qué es un metal o una aleación refractaria? ¿Qué es un metal precioso?
- 13-31 Se aumenta la temperatura de una pieza de tungsteno recubierto. ¿Qué ocurre cuando el recubrimiento protector en una pieza de tungsteno se dilata más que el tungsteno mismo? ¿Qué ocurre cuando el recubrimiento protector en una pieza de tungsteno se dilata menos que el tungsteno mismo?
- 13-32 ¿Cuáles son algunas de las aplicaciones del W?
- 13-33 ¿En qué aplicaciones se utilizan Pt, Rh, Pd y Ag?
- 13-34 ¿Qué metales se utilizan como catalizadores para los convertidores catalíticos en los automóviles? ¿Cuáles son las reacciones en las que estos metales sirven de catalizadores?

Problemas de diseño

- 13-35 Un componente para el soporte de motor de un avión privado debe ocupar un volumen de 60 cm³ con un espesor mínimo de 0.5 cm y un ancho mínimo de 4 cm. La carga sobre la pieza durante su uso puede llegar hasta los 75 000 N. Se espera que el componente deba funcionar por debajo de los 100 °C durante su vida útil. Diseñe un material, así como su

tratamiento, que funcione de manera satisfactoria en esta aplicación.

- 13-36 Deseamos diseñar los peldaños de una escalera. La escalera debe ser ligera de manera que pueda transportarse y usarse con facilidad. Los peldaños de la escalera deben ser de 0.25 pulg × 1 pulg y de un largo de 12 pulg. Diseñe un material, así como su tratamiento, para dichos peldaños.
- 13-37 Se ha determinado la necesidad de una aleación con una densidad de 2.3 ± 0.05 g/cm³ que sea resistente y, a la vez, que tenga cierta ductilidad. Diseñe un material, así como su proceso, que pudiera cumplir estos requisitos.
- 13-38 Es necesario diseñar un dispositivo de montaje que posicione y dirija un rayo láser para el corte de precisión de un material compuesto. ¿Qué requisitos de diseño podrían ser importantes? Diseñe un material y su procesamiento que pudiera llenar estos requisitos.
- 13-39 Diseñe una aleación níquel-titanio que produzca una mezcla de 60 % volumétrico de Ni₃Ti precipitado en una matriz de níquel puro.
- 13-40 Una palanca accionadora de un dispositivo eléctrico debe abrir y cerrar de manera casi instantánea y, una vez cerrada, debe transportar una elevada corriente. ¿Qué requisitos de diseño serían importantes en esta aplicación? Diseñe un material y su procesamiento que cumplan con estos requisitos.
- 13-41 Un álabe de ventilador en una planta química debe operar a temperaturas de hasta 400 °C bajo condiciones bastante corrosivas. Ocasionalmente se succiona algo de material sólido, mismo que impacta sobre el ventilador. ¿Qué requisitos de diseño son de importancia? Diseñe un material y su procesamiento para esta aplicación.

Problema en computadora

- 13-42 Sistema de identificación por base de datos para las aleaciones. Escriba un programa que le solicite al usuario que escriba un código de 3 o 4 dígitos para las aleaciones de aluminio (tabla 13-3). Deberá pedirle al usuario que escriba un dígito a la vez o que encuentre la manera de comparar dígitos diferentes en una cadena. Esto será seguido por una letra y un número (por ejemplo, T y 4). El programa deberá entonces darle al usuario alguna información más detallada referente al tipo de aleación. Por ejemplo, si el usuario escribe 2024 y después T4, el programa deberá desplegar una salida que especifique que a) la aleación es del tipo de forja, b) el principal elemento de aleación (puesto que el primer dígito es 2) es el Cu y c) ha sido envejecido naturalmente. No diseñe un programa demasiado complejo. La idea principal aquí es que usted visualice la forma en que se diseñan las bases de datos para las aleaciones.

By Arkanosant...

Capítulo



Los materiales cerámicos desempeñan un destacado papel en una amplia diversidad de tecnologías relacionadas con la electrónica, el magnetismo, la óptica y la energía. Muchos materiales cerámicos avanzados realizan una función muy importante al aportar aislamiento térmico y propiedades en altas temperaturas. Las aplicaciones de los materiales cerámicos comprenden desde tarjetas de crédito, carcasas para chips de silicio, losas para transbordadores espaciales, imagen médica, fibras ópticas que habilitan la comunicación y vidrios seguros y eficientes en energía. Los materiales cerámicos tradicionales desempeñan una función importante como refractarios para el procesamiento de metales y para aplicaciones de consumo. (Cortesía de NASA.)

Materiales cerámicos

¿Alguna vez se preguntó...

- ...de qué está hecha la tira magnética de las tarjetas de crédito?
- ...qué material se utiliza para proteger el transbordador espacial de las altas temperaturas generadas durante el reingreso a la atmósfera?
- ...qué material cerámico se agrega comúnmente a las pinturas?
- ...qué material cerámico se encuentra en los huesos y en los dientes?
- ...de qué están hechas las bujías?

La meta de este capítulo es examinar más de cerca la síntesis, el procesamiento y las aplicaciones de los materiales cerámicos. Éstos se han utilizado durante miles de años.[1] La mayoría de los materiales cerámicos presentan una buena resistencia a la compresión; sin embargo, no exhiben virtualmente nada de ductilidad a la tensión. La familia de los materiales cerámicos incluye materiales inorgánicos policristalinos y de un solo cristal,

vidrios inorgánicos amorfos y vitrocerámicos.[2] Hemos analizado muchos de estos materiales en capítulos anteriores.

En los capítulos 2 y 3, aprendimos lo relacionado con los enlaces en los materiales cerámicos, las estructuras cristalinas de materiales cerámicos tecnológicamente útiles, la existencia de defectos iónicos (notación Kroger-Vink para química de defectos) y los arreglos de iones en

los vidrios. En el capítulo 4 y en otros capítulos, examinamos el proceso para la fabricación de vidrio flotado. En el capítulo 8, examinamos cómo se aplican los principios de nucleación y de crecimiento para la preparación de los vitrocerámicos. En el capítulo 10 vimos los diagramas de fases para sistemas cerámicos como $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. [3] Utilizaremos ahora estas ideas previamente desarrolladas para continuar explorando el universo de los materiales cerámicos.

Este capítulo se enfocará en la síntesis, procesamiento y aplicaciones de los materiales cerámicos, especialmente en los de tecnología avanzada o de alta tecnología. Recapitularemos también sobre el procesamiento y las aplicaciones de los vidrios inorgánicos y de los vitrocerámicos. Empezaremos con un análisis que resumirá la clasificación y las aplicaciones de los materiales cerámicos.

14-1 Aplicaciones de los materiales cerámicos

Existen muchas maneras distintas de clasificar los materiales cerámicos. Una de ellas es definirlos con base en la clase de sus compuestos químicos (por ejemplo, óxidos, carburos, nitruros, sulfuros, fluoruros, etc.). Otra forma, la cual utilizaremos aquí, es clasificar los materiales cerámicos según su función principal.

Los materiales cerámicos se utilizan en una amplia gama de tecnologías como refractarios, bujías, dieléctricos en capacitores, sensores, abrasivos, medios de grabación magnética, etc. El transbordador espacial utiliza ~25 000 losas cerámicas ligeras, reutilizables y muy porosas, que protegen al fuselaje de aluminio del calor generado durante el reingreso en la atmósfera terrestre. Estas losas están fabricadas de fibras de sílice (o sílica) de alta pureza y sílice coloidal recubierto con un vidrio de silicato de boro. Los materiales cerámicos también pueden aparecer en la naturaleza en forma de óxidos o como materiales naturales; el cuerpo humano tiene la capacidad asombrosa de fabricar hidroxiapatita, un material cerámico que se encuentra en los huesos y en los dientes. Los materiales cerámicos se utilizan también como recubrimientos. Los **vidriados** son recubrimientos cerámicos aplicados a objetos de vidrio; los **esmaltes** son recubrimientos cerámicos aplicados a objetos metálicos. Sigamos la clasificación que aparece en la tabla 14-1 y anotemos las diferentes aplicaciones. La alúmina y el silicio son los materiales cerámicos de mayor uso y, como se observará, existen numerosas aplicaciones en una lista en dicha tabla que dependen del uso de esos dos materiales cerámicos.

A continuación aparece un breve resumen de las aplicaciones de algunos de los materiales de más amplio uso:

- **Alúmina** (Al_2O_3) se utiliza para contener metales fundidos o en aplicaciones donde el material debe operar a altas temperaturas, pero donde también se requiere una elevada resistencia mecánica. La alúmina también se utiliza como un sustrato con una constante dieléctrica reducida para receptáculos o empaques electrónicos que alojan chips de silicio. Una aplicación clásica es en los aisladores de las bujías. También se han encontrado algunas aplicaciones únicas para uso médico y dental. La alúmina contaminada con cromo se utiliza para fabricar láseres. También se utilizan finas partículas de alúmina como soporte de catalizador.
- El **nitruro de aluminio** (AlN) sirve como un buen aislante eléctrico, aunque tiene una elevada conductividad térmica. Dado que su coeficiente de expansión térmica es similar a la del silicio, el AlN es un buen reemplazo para el Al_2O_3 como material para sustrato de los circuitos integrados. Se reducen las grietas y se obtiene aislamiento eléctrico; a pesar de lo anterior, el calor generado por el circuito electrónico se puede eliminar con rapidez. También es más adecuado que muchos otros materiales competidores para usarse en circuitos eléctricos que operan a alta frecuencia.

TABLA 14-1 ■ Clasificación funcional de los materiales cerámicos

Función	Aplicación	Ejemplo de materiales cerámicos
Eléctricos	Dielectricos para capacitores	BaTiO ₃ , SrTiO ₃ , Ta ₂ O ₅
	Dielectricos para microondas	Ba(Mg _{1/3} Ta _{2/3})O ₃ , Ba(Zn _{1/3} Ta _{2/3})O ₃
	Óxidos conductores	BaTi ₄ O ₉ , Ba ₂ Ti ₉ O ₂₀ , Zr _x Sn _{1-x} TiO ₄ , Al ₂ O ₃
	Superconductores	SnO ₂ dopado con In (ITO)
	Encapsulados electrónicos	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} (YBCO)
	Aisladores	Al ₂ O ₃
	Celdas de combustible de óxido sólido	Porcelana
	Piezoelectricos	ZrO ₂ , LaCrO ₃
	Electroópticos	Pb(Zr _x Ti _{1-x})O ₃ (PZT), Pb(Mg _{1/3} Nb _{2/3})O ₃
		PLZT, LiNbO ₃
Magnéticos	Medio para grabación	γ-Fe ₂ O ₃ , CrO ₂ (casetes de "cromo")
	Ferrolíquidos, tarjetas de crédito	Fe ₃ O ₄
	Circuitos, aisladores	Ferrita al níquel-zinc
	Inductores, imanes	Ferrita al manganeso-zinc
Ópticos	Fibras ópticas	SiO ₂ dopado
	Vidrios	Base SiO ₂
	Láseres	Al ₂ O ₃ , almandinato de itrio y aluminio (YAG)
	Iluminación	Al ₂ O ₃ , vidrios
Automotriz	Sensores de oxígeno, celdas de combustible	ZrO ₂
	Apoyo catalítico	Cordierita
	Bujías	Al ₂ O ₃
	Neumáticos	SiO ₂
	Parabrisas/ventanas	Vidrios base SiO ₂
Mecánico y estructural	Herramientas de corte	Cermets WC-Co
		SiAlON
		Al ₂ O ₃
	Compuestos	Fibras de vidrio de sílice, SiC, Al ₂ O ₃
	Abrasivos	SiC, Al ₂ O ₃ , diamante, BN, ZrSiO ₄
Biomédicos	Prótesis	Hidroxiapatita
	Odontología	Porcelana, Al ₂ O ₃
	Imagen por ultrasonido	PZT
Construcción	Edificios	Concreto
		Vidrio
		Muebles sanitarios
Otros	Aplicaciones militares	PZT, B ₄ C
	Materiales para blindajes	
	Sensores	SnO ₂
	Nuclear	UO ₂
	Procesamiento de metales	Vidrios para triturador de basura
Químico	Catalizador	Refractarios basados en alúmina y en sílice,
	Filtración de aire y líquidos	sensores de oxígeno, moldes de fundición,
	Sensores	etcétera
	Pinturas, hules	Varios óxidos (Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , ZnO, TiO ₂)
Doméstico	Azulejos, muebles sanitarios	Arcilla, alúmina y cerámicas basadas en sílice, materiales vitrocerámicos, diamante, rubí, zirconia cúbica y otros cristales
	Línea blanca, utensilios de cocina	
	Alfarería, artes, joyería	

*Las siglas están indicadas en letra cursiva.

- El *titanato de bario* (BaTiO_3) es el material cerámico electrónico de más amplia utilización. Varios millones de capacitores se fabrican utilizando este material. Tiene una constante dieléctrica elevada que hace posible fabricar capacitores más pequeños que pueden retener cantidades considerables de carga (capítulo 18).
- El *carburo de boro* (B_4C) es muy duro y al mismo tiempo extraordinariamente ligero. El carburo de boro es el tercer material más duro conocido, después del diamante y del nitruro de boro cúbico (CBN). Además de su utilización como blindaje nuclear, se le utiliza en aplicaciones que requieren una excelente resistencia a la abrasión y como una porción de placa de blindaje a prueba de balas, a pesar de que a altas temperaturas tiene propiedades un tanto pobres.
- La *cordierita* ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) es útil como material cerámico electrónico. También se le utiliza para elaborar una estructura en panal utilizada en los catalizadores de los convertidores catalíticos. Este soporte contiene una dispersión de partículas de metal como el Pt, Rh, etc., de tamaño minúsculo que sirven como catalizadores.
- El *diamante* (C) es el material más duro existente en la naturaleza. Los diamantes industriales se utilizan como abrasivos para pulverizar y pulir. Mediante procesos de deposición químicos al vapor, se preparan los recubrimientos de diamante y materiales tipo diamante resistentes a la abrasión, para muchas aplicaciones diferentes; por ejemplo, herramientas de corte. También es, por supuesto, utilizado en joyería.
- *Titanato de plomo zirconio* (PZT) éste es el material piezoeléctrico de mayor uso (capítulo 18). En este material, la aplicación de presión o de un esfuerzo genera un voltaje. Además, la aplicación de un voltaje ocasiona el desarrollo de una deformación en este material. Como resultado, el PZT se utiliza en muchas aplicaciones, tales como encendedores de gas, submarinos para la detección de objetos bajo el agua e imagen por ultrasonido.
- La *silíce o sílica* (SiO_2) es posiblemente el material cerámico de uso más amplio; es el ingrediente esencial de los vidrios y de muchos otros materiales vitrocerámicos. Los materiales basados en la sílice se usan en aislamientos térmicos, refractarios, abrasivos, como compuestos reforzados con fibras, cristalería para laboratorio, etc. En forma de fibras largas continuas, la sílice se utiliza para la fabricación de fibras ópticas para comunicaciones.
- El *carburo de silicio* (SiC) tiene una extraordinaria resistencia a la oxidación a temperaturas incluso por arriba del punto de fusión del acero. El SiC se usa con frecuencia como recubrimiento para los metales, los materiales compuestos carbono-carbono y otros materiales cerámicos para protegerlos a esas temperaturas extremas; también se utiliza como abrasivo en las ruedas rectificadoras y como un particulado y refuerzo fibroso tanto en matrices metálicas como en matrices de materiales compuestos. Asimismo, se le utiliza para la fabricación de elementos calefactores para hornos. Es semiconductor y muy buen candidato para dispositivos electrónicos a altas temperaturas.
- El *nitruro de silicio* (Si_3N_4) tiene propiedades parecidas a las del SiC , aunque su resistencia a la oxidación y su resistencia en altas temperaturas es un poco menor. Tanto el nitruro de silicio como el carburo de silicio son posibles candidatos para componentes para motores de automóvil y para turbinas de gas, ya que permiten temperaturas de operación más elevadas y mejores eficiencias en el combustible con menos peso que los metales y las aleaciones tradicionales.
- *Sialon* son las siglas en inglés de oxinitruro de aluminio y silicio (*silicon aluminum oxynitride*). Se forma cuando el aluminio y el oxígeno se sustituyen parcialmente por silicio y por nitrógeno en el nitruro de silicio. La forma general del material es $\text{Si}_{6-z}\text{Al}_z\text{O}_z\text{N}_{8-z}$; cuando $z = 3$, la fórmula es $\text{Si}_3\text{Al}_3\text{O}_3\text{N}_5$. Los cristales de sialon comúnmente se encuentran incrustados en una fase vídrica basada en Y_2O_3 ; después, a la fase vídrica se le permite desvitrificarse (cristalizarse) mediante un tratamiento térmico para mejorar la resistencia a la termofluencia. El resultado es un material cerámico relativamente ligero, con un bajo coeficiente de expansión térmica, buena tenacidad a la fractura y una resistencia más elevada que muchos de los demás materiales cerámicos avanzados. El sialon puede encontrar

aplicación en herramientas de corte, componentes para motor y otras que incluyan simultáneamente altas temperaturas y severas condiciones de desgaste.

- El *bióxido de titanio* (TiO_2) se utiliza para la fabricación de materiales cerámicos electrónicos como el BaTiO_3 ; sin embargo, su uso más extenso es en forma de pigmento blanco para la fabricación de pinturas. El titanio se utiliza en ciertos materiales vitrocerámicos como agente de nucleación. Se utilizan pequeñas partículas de TiO_2 para fabricar lociones bronceadoras que sirven de protección contra los rayos ultravioleta.
- El *boruro de titanio* (TiB_2) es un buen conductor tanto de la electricidad como del calor; además, proporciona una excelente tenacidad. El TiB_2 , junto con el carburo de boro, carburo de silicio y la alúmina, tienen aplicaciones en la producción de blindajes.
- El *bióxido de uranio* (UO_2) es ampliamente utilizado como combustible de reactor nuclear. Este material tiene una estabilidad dimensional excepcional, ya que su estructura cristalina puede aceptar los productos del proceso de fisión.
- Los cristales de *almandinato de aluminio itrio* (YAG, $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) se utilizan como huéspedes para la manufactura del láser Nd-YAG.
- El *óxido de zinc* (ZnO) se utiliza como acelerador en la vulcanización del hule que se utiliza, por ejemplo, en los neumáticos (capítulo 15). También se utiliza en pinturas, en dispositivos de protección contra oscilaciones, en polvos medicinales cutáneos, así como en ungüentos para la piel.
- La *zirconia* (ZrO_2) se utiliza para fabricar muchos otros materiales cerámicos como el zirconio. También se usa para fabricar sensores del gas oxígeno utilizados en los automóviles y para medir el oxígeno disuelto en los aceros líquidos. La zirconia se utiliza como aditivo en muchos materiales cerámicos electrónicos, así como material refractario. La forma cúbica de los cristales individuales de zirconia se utiliza para hacer artículos de joyería. Es posible que para el año 2015 aparezcan automóviles con celdas de combustible basadas en zirconia.

14-2 Propiedades de los materiales cerámicos

Las propiedades de algunos materiales cerámicos aparecen resumidas en la tabla 14-2.[4,5] En la tabla 14-3 se resumen las propiedades mecánicas de algunos materiales cerámicos estructurales.

Tome nota de las elevadas temperaturas de fusión y de las altas resistencias a la compresión de los materiales cerámicos. Como mencionamos en el capítulo 6, el peso de todo un carro de bomberos puede ser soportado por cuatro tazas cafeteras de material cerámico. También debemos recordar que los valores de resistencia a la tensión y a la flexión muestran valores considerables,

TABLA 14-2 ■ Propiedades de materiales cerámicos policristalinos de uso común

Material	Punto de fusión (°C)	Coefficiente de expansión térmica ($\times 10^{-6}$ cm/cm/°C)	Dureza Knoop (HK) (100 g)
Al_2O_3	2000	~6.8	2100
BN	2732	0.57 ^a , -0.46 ^b	5000
SiC	2700	~3.7	2500
Diamante		1.02	7000
Mulita	1810	4.5	—
TiO_2	1840	8.8	—
ZrO_2 cúbico	2700	10.5	—

^a Perpendicular a la dirección de la presión.

^b Paralelo a la dirección de la presión.

TABLA 14-3 ■ *Propiedades mecánicas de materiales cerámicos avanzados seleccionados*

Material	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia a la flexión (psi)	Resistencia a la compresión (psi)	Módulo de Young (psi)	Tenacidad a la fractura (psi $\sqrt{\text{pulg}}$)
Al ₂ O ₃	3.98	30 000	80 000	400 000	56 × 10 ⁶	5 000
SiC (sinterizado)	3.1	25 000	80 000	560 000	60 × 10 ⁶	4 000
Si ₃ N ₄ (unido por reacción)	2.5	20 000	35 000	150 000	30 × 10 ⁶	3 000
Si ₃ N ₄ (comprimido con calor)	3.2	80 000	130 000	500 000	45 × 10 ⁶	5 000
Sialon	3.24	60 000	140 000	500 000	45 × 10 ⁶	9 000
ZrO ₂ (parcialmente estabilizado)	5.8	65 000	100 000	270 000	30 × 10 ⁶	10 000
ZrO ₂ (con tenacidad mejorada por transformación)	5.8	50 000	115 000	250 000	29 × 10 ⁶	11 000

ya que la resistencia de los materiales cerámicos depende de la distribución de los tamaños de los defectos y no se ve afectada por los movimientos de dislocaciones. Analizamos en el capítulo 6 la distribución Weibull y la resistencia de los materiales cerámicos y de los vidrios.[6,7] También obsérvese que, contra lo que se piensa comúnmente, los materiales cerámicos no siempre son frágiles. Bajo velocidades de deformación más lentas y a elevadas temperaturas, muchos materiales cerámicos con un tamaño de grano muy fino, realmente muestran un comportamiento superplástico.[8] Esto se analizó en el capítulo 7.

14-3 Síntesis de los polvos cerámicos

Los materiales cerámicos se funden a altas temperaturas y presentan un comportamiento frágil a la tensión. Como resultado, el moldeo y el procesamiento termomecánico, ampliamente utilizados para los metales, las aleaciones y los termoplásticos, no pueden ser aplicados al procesar los materiales cerámicos. Sin embargo, los vidrios inorgánicos utilizan temperaturas de fusión más reducidas, gracias a la formación de eutécticos en el proceso de vidrio flotado.[9] En vista de que la fusión, el moldeo y el procesamiento termomecánico no son opciones viables para los materiales cerámicos policristalinos, generalmente procesamos los materiales cerámicos en formas útiles a partir de polvos cerámicos. Un "polvo" es una colección de finas partículas. El paso de fabricación de un polvo cerámico se define aquí como la **síntesis** de los materiales cerámicos. Partimos de un polvo cerámico y lo preparamos para formarlo mediante triturado, molido, separación de impurezas, mezclado de polvos diferentes, secado, **secado por atomización** para formar aglomerados blandos. Posteriormente, se utilizan varias técnicas diferentes, como compactación, **moldeo en cinta**, extrusión y **moldeo por escurrimiento**, para convertir polvos correctamente procesados a la forma deseada, conocida como **cerámico en verde**. Un cerámico en verde es un material cerámico que todavía no ha sido sinterizado. Los pasos para la conversión de un polvo cerámico (o de una mezcla de polvos) en una forma útil se conoce como **procesamiento de los polvos**. El cerámico en verde se consolida a continuación utilizando un tratamiento de alta temperatura conocido como sinterizado o quemado. En este proceso, se calienta el cerámico en verde a una temperatura elevada, utilizando un tratamiento térmico con atmósfera controlada, a fin de obtener un material denso. El material cerámico es sujeto después a operaciones adicionales como el rectificado, pulido o maquinado, según se requiera para la aplicación final. En algunos casos, se fijarán terminales, se depositarán electrodos o se depositarán recubrimientos. Estos pasos, que en general se encuentran en la síntesis y en el procesamiento de los materiales cerámicos, se resumen en la figura 14-1.

A continuación, describiremos las técnicas tradicionales de síntesis para algunos materiales cerámicos de uso común. Estas técnicas utilizadas para la manufactura de los polvos cerámicos también se conocen como el proceso "mezcla de óxidos".

EJEMPLO 14-3**Sinterizado de dieléctricos para microondas**

Un fabricante de tantalato de bario-zinc ($\text{Ba}(\text{Zn}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3$, o materiales cerámicos BZT) produce dispositivos cilíndricos en forma de discos, conocidos como resonadores dieléctricos. Los discos especiales fabricados en este caso tienen dos pulgadas de diámetro y media pulgada de espesor, con una perforación de media pulgada en su centro. El sinterizado de estas piezas se efectúa mediante aditivos a 1500°C . El proceso de manufactura utilizado para la fabricación de estas piezas es bien conocido. Súbitamente, un día salió del horno un lote de resonadores dieléctricos con grietas y tuvo que ser rechazado. El gerente de la planta determinó que el material había alcanzado el 98% del nivel teórico objetivo de densificación. ¿Cuál podría ser la causa de las grietas?

SOLUCIÓN

Los problemas como el descrito deben ser rastreados a través de todo el proceso de manufactura, iniciando con las materias primas, su mezcla, su compactación y el uso de aglutinantes. En una operación de manufactura de calidad (como la que debe tenerse con una certificación ISO 9000), todas las materias primas, los pasos de manufactura, los procedimientos y los proveedores deben ser identificables. En vista de que los resonadores han alcanzado el nivel de densificación pretendido, lo más probable es que la composición del lote era buena.

En este caso, se verificaron las materias primas, mismas que no mostraron algún nivel fuera de lo común de impurezas conocidas. Además, la mezcla de polvos se había efectuado correctamente. También las piezas habían sido compactadas apropiadamente. Mediante conversaciones con el operador del horno, se puso de manifiesto que se había incrementado la velocidad de la banda transportadora del horno, con el objeto de que el operador pudiera irse una hora más temprano, con lo que las piezas se enfriaron demasiado rápido. Los resonadores dieléctricos resultantes desarrollaron microgrietas debido al enfriamiento rápido desde la temperatura de sinterizado. El problema, en este caso, se debió a un error humano. Frecuentemente, en el procesamiento cerámico de los materiales, se pueden rastrear problemas ocasionados por cambios en las materias primas, diferentes proveedores y otros sucesos impredecibles.

14-5**Características de los materiales cerámicos sinterizados**

En el caso de los materiales cerámicos sinterizados, el tamaño promedio del grano, la distribución del tamaño del grano y el nivel y tipo de porosidad son importantes. De igual manera, dependiendo de la aplicación, pueden presentarse segundas fases en la microestructura en forma de granos separados de componentes disueltos en soluciones sólidas de la matriz, por lo que las segundas fases en los límites de grano también son de importancia. En el caso de los materiales cerámicos extruidos, también pueden resultar importantes los efectos de la orientación.

Granos y límites de grano Con frecuencia, el tamaño promedio del grano está íntimamente relacionado con el tamaño de la partícula primaria (Figs. 14-4 y 14-7). Una excepción a lo anterior es cuando se presenta un crecimiento de grano debido a largos tiempos de sinterizado o a un crecimiento exagerado o anormal del grano (capítulo 5). Los materiales cerámicos con un tamaño pequeño de grano son más resistentes que los de grano grueso. Los tamaños de grano más finos ayudan a reducir esfuerzos que se desarrollan en los límites de grano debido a expansión y contracción anisotrópicas. Normalmente, partiendo de materias primas cerámicas más finas se produce un tamaño más fino de grano. Las propiedades magnéticas, dieléctricas y ópticas de los materiales cerámicos dependen del tamaño promedio del grano y, en esas aplicaciones, el tamaño del grano debe controlarse adecuadamente. Aunque no hemos analizado

lo anterior en detalle, en ciertas aplicaciones, es importante utilizar cristales individuales de materiales cerámicos con la finalidad de evitar los nocivos límites de grano que están siempre presentes en los materiales cerámicos policristalinos. En algunas otras aplicaciones, por ejemplo para dispositivos de protección contra oscilaciones eléctricas basados en ZnO , es importante que los límites de grano tengan una composición química diferente que la del grano mismo. Esta composición y su estructura permiten que a cierto voltaje ocurra la descomposición eléctrica del material a lo largo de los límites de grano. Con esto se ayuda a proteger el equipo que esté conectado al protector de oscilaciones, dado que la corriente eléctrica pasa a través del dispositivo ZnO , en lugar de a través del equipo. En estos casos, a las formulaciones ZnO se les agregan aditivos especiales, por ejemplo el Sb_2O_3 o el Bi_2O_3 .

Porosidad Los poros representan el defecto de mayor importancia presente en los materiales cerámicos policristalinos. La presencia de poros suele ser perjudicial para las propiedades mecánicas de los materiales cerámicos en bloque, en vista de que dichos poros son una localización preexistente a partir de la cual puede crecer una grieta. La presencia de poros es una de las razones por las cuales los materiales cerámicos muestran un comportamiento tan frágil bajo carga a la tensión. Dado que existe una distribución de tamaños de poro, y el nivel general de porosidad se modifica, así varían las propiedades mecánicas de estos materiales. Esta variación se mide utilizando la estadística de Weibull (capítulo 6).[6] La presencia de poros, por otra parte, puede resultar de utilidad para incrementar la resistencia al choque térmico. En ciertas aplicaciones, como filtros para metales y aleaciones calientes o para líquidos o gases, es deseable la presencia de poros interconectados.

En un material cerámico, los poros pueden estar interconectados o cerrados. La **porosidad aparente** mide los poros interconectados y determina la permeabilidad, es decir, la facilidad con que los gases y los fluidos pasan a través del componente cerámico. La porosidad aparente se determina pesando el material cerámico seco (W_d) y volviendo a pesarlo tanto después de haber estado suspendido en agua (W_w) como después de haber sido retirado de la misma (W_i). Utilizando unidades de gramos y cm^3 :

$$\text{Porosidad aparente} = \frac{W_w - W_d}{W_w - W_i} \times 100 \quad (14-1)$$

La **porosidad real** incluye tanto los poros interconectados como los no interconectados o cerrados. La porosidad real, que se correlaciona más de cerca con las propiedades del material cerámico, es:

$$\text{Porosidad real} = \frac{\rho - B}{\rho} \times 100, \quad (14-2)$$

donde

$$B = \frac{W_d}{W_w - W_i} \quad (14-3)$$

B es la **densidad en volumen** y ρ es la densidad verdadera o gravedad específica del material cerámico. La densidad en volumen es el peso del material dividido entre su volumen. El siguiente ejemplo ilustra la forma en que se determinan los niveles de porosidad en los materiales cerámicos.

EJEMPLO 14-4 Materiales cerámicos de carburo de silicio

Las partículas de carburo de silicio se compactan y se queman a elevadas temperaturas para producir una fuerte forma cerámica. La gravedad específica del SiC es 3.2 g/cm^3 . Posteriormente, la forma cerámica se pesa cuando está seca (360 g), después de sumergirla en agua (385 g) y mientras se encuentra suspendida en ella (224 g). Calcule la porosidad aparente, la porosidad real y el porcentaje de volumen de poros cerrados.

SOLUCIÓN

$$\text{Porosidad aparente} = \frac{W_w - W_d}{W_w - W_s} \times 100 = \frac{385 - 360}{385 - 224} \times 100 = 15.5\%$$

$$\text{Densidad volumétrica} = B = \frac{W_d}{W_w - W_s} = \frac{360}{385 - 224} = 2.24$$

$$\text{Porosidad real} = \frac{\rho - B}{\rho} \times 100 = \frac{3.2 - 2.24}{3.2} \times 100 = 30\%$$

El porcentaje de poros cerrados es igual a la porosidad real menos la aparente, es decir $30 - 15.5 = 14.5\%$. Entonces:

$$\text{Fracción de poros cerrados} = \frac{14.5}{30} = 0.483$$

146

Vidrios inorgánicos

En el capítulo 3, analizamos materiales amorfos como los vidrios, los geles y las películas amorfas delgadas. También vimos los conceptos de orden de corto alcance en contraposición con largo alcance, en función de los arreglos atómicos o iónicos en materiales no cristalinos. El material más importante no cristalino es el vidrio, especialmente aquellos basados en sílice. Naturalmente, existen vidrios basados en otros compuestos (como sulfuros, fluoruros y otras aleaciones diversas). Un vidrio es un material metaestable que se ha endurecido y se ha hecho rígido sin cristalizar. En cierta forma, un vidrio se parece a un líquido subenfriado. Por debajo de la **temperatura de vitrificación** (Fig. 14-8), la velocidad de contracción volumétrica durante el enfriamiento se reduce y el material puede considerarse un "vidrio", en lugar de un "líquido subenfriado". Uniéndolos tetraedros de sílice u otros grupos iónicos, se produce un sólido, pero las estructuras vítreas se producen por la estructura no cristalina (capítulo 3).

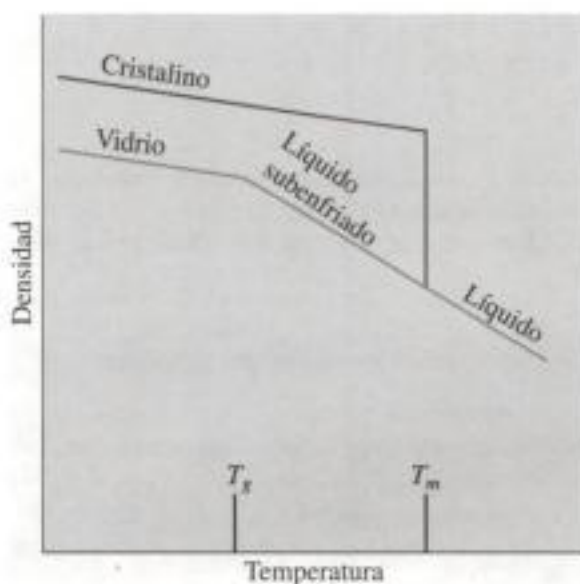


Figura 14-8

Cuando el sílice se cristaliza al enfriarse, se observa un cambio abrupto en la densidad. Sin embargo, en el caso del sílice vítreo, el cambio en la pendiente de la temperatura del vidrio indica la formación de un vidrio a partir de un líquido subenfriado. El vidrio no tiene un T_m o un T_g fijos. Los materiales cristalinos tienen un T_m fijo y no tienen un T_g .

$$\frac{O}{Si} = \frac{\left(3 \frac{\text{iones O}}{B_2O_3}\right) (f_B) + \left(2 \frac{\text{iones O}}{SiO_2}\right) (1 - f_B)}{\left(1 \frac{\text{ion Si}}{SiO_2}\right) (1 - f_B)} = 2.5$$

$$3f_B + 2 - 2f_B = 2.5 - 2.5f_B \text{ o } f_B = 0.143$$

Por tanto, deberá producirse un vidrio que contenga un máximo de 14.3 mol% B_2O_3 . En porcentaje de peso:

$$\% \text{ en peso } B_2O_3 = \frac{(f_B)(69.62 \text{ g/mol})}{(f_B)(69.62 \text{ g/mol}) + (1 - f_B)(60.08 \text{ g/mol})} \times 100$$

$$\% \text{ en peso } B_2O_3 = \frac{(0.143)(69.62)}{(0.143)(69.62) + (0.857)(60.08)} \times 100 = 16.2$$

14.7 Procesos y aplicaciones de los vidrios

Los vidrios se manufacturan para producir artículos de gran utilidad, se fabrican a alta temperatura con viscosidad controlada, a fin de que se puedan conformar sin romper. La figura 14-12 ayuda a comprender el proceso en función de los rangos de viscosidad.

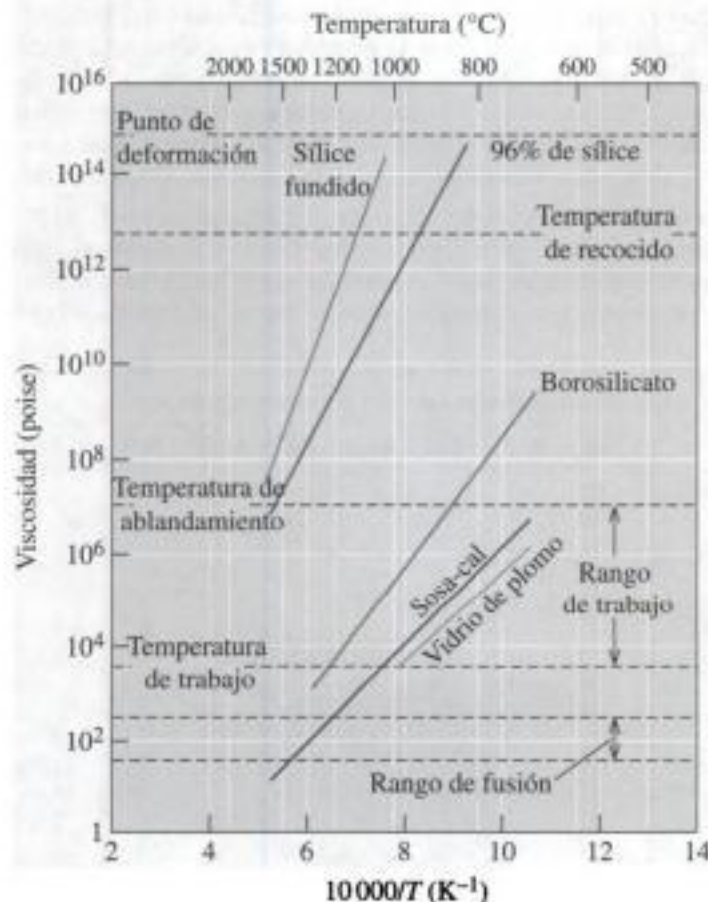


Figura 14-12 Efecto de la temperatura y de la composición sobre la viscosidad del vidrio.

todo tipo de luz, y no solamente a radiaciones ultravioletas. De igual manera, en los vidrios de silicato se nuclean cristales minúsculos de semiconductores, como el sulfuro de cadmio (CdS), en un proceso conocido como *striking*. Estos vidrios muestran colores brillantes y también tienen propiedades ópticas útiles. Algunos de los cristales semiconductores como éstos se conocen como puntos cuánticos y son materiales candidatos para dispositivos electroópticos.[22]

EJEMPLO 14-6 Diseño de un vidrio de sosa-cal

Diseñe un vidrio de sosa-cal que pueda ser vaciado a una temperatura de 1000 °C.

SOLUCIÓN

Para el vaciado, el vidrio deberá calentarse por encima de su temperatura de liquidus. Su viscosidad deberá ser lo suficientemente baja para que fluya fácilmente dentro del molde. Por tanto, si deseamos vaciar el líquido a 1000 °C, seleccionaríamos una composición para el vidrio con un liquidus inferior, digamos 900 °C. Suponga que utilizamos las composiciones siguientes (indicadas en el diagrama de fases sílice-sosa-cal, de la figura 14-16):

Vidrio A: 74% SiO₂-13% CaO-13% Na₂O

Vidrio B: 74% SiO₂-6% CaO-20% Na₂O

Vidrio C: 80% SiO₂-7% CaO-13% Na₂O

Partiendo de la curva liquidus, encontramos que el vidrio A tiene un liquidus de 1200 °C; el vidrio B, un liquidus de 900 °C; y el C, un liquidus de 1300 °C. De estos tres vidrios, nuestra selección obvia es el vidrio B.

Por supuesto, otras composiciones también podrían tener un liquidus de 900 °C. Si incrementamos ligeramente el CaO, todavía obtendremos un vidrio con el liquidus requerido, pero el proceso será más difícil; si reducimos el CaO, también obtenemos un vidrio con el liquidus requerido, pero su solubilidad en el agua se incrementará.

14-8 Materiales vitrocerámicos

Los materiales vitrocerámicos son materiales cristalinos derivados de los vidrios amorfos. Por lo común, los materiales vitrocerámicos tienen un nivel considerable de cristalinidad (~ 70 -99%).[2] Como mencionamos en los capítulos 3 y 8, Don Stookey descubrió por casualidad la formación de los materiales vitrocerámicos.[23] Con los materiales vitrocerámicos, podemos aprovechar su conformabilidad y su densidad. Se puede obtener un producto con muy baja porosidad produciendo una forma mediante técnicas de conformación convencionales, como por ejemplo prensado o soplado. Sin embargo, el vidrio tiene mala resistencia a la termofluencia. A continuación cristalizamos el vidrio utilizando nucleación heterogénea mediante óxidos, como el TiO₂ y/o el ZrO₂. Estos óxidos reaccionan tanto con el vidrio como entre sí y proporcionan los núcleos que finalmente conducen a la cristalización del vidrio. La separación de fase de los vidrios (capítulo 10) desempeña una función importante en la formación de los núcleos. En algunos materiales vitrocerámicos comerciales (por ejemplo Visionware™), se forman nanocristales y el material resultante se conserva ópticamente transparente.

El primer paso para la producción de un material vitrocerámico es asegurarse de que no ocurra cristalización durante el enfriamiento a partir de la temperatura de conformado. Para los vidrios basados en silicatos, se puede estudiar un diagrama de transformación de enfriamiento continuo e isotérmico, muy parecido a los diagramas CCT y TTT para los aceros. La figura 14-17(a) muestra un diagrama TTT para un vidrio. Si el vidrio se enfría demasiado lentamente,

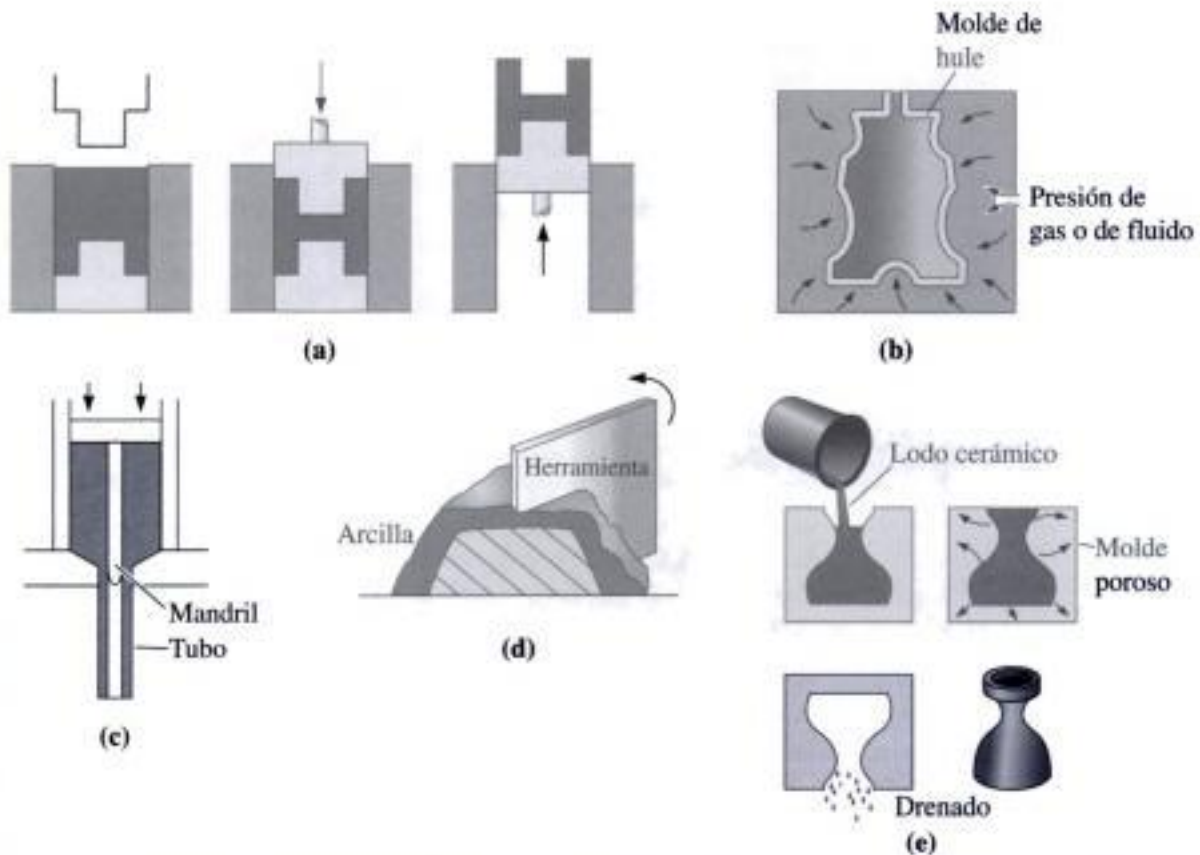


Figura 14-18 Procesos para dar forma a los cerámicos cristalinos: (a) compresión, (b) prensado isostático, (c) extrusión, (d) moldeo por tarraja y (e) vaciado o moldeo por escurrimiento.

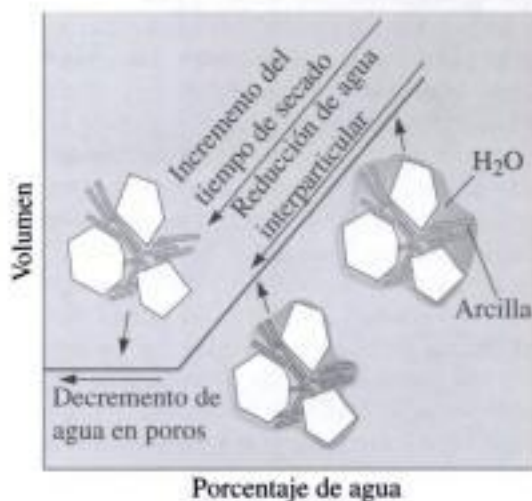


Figura 14-19 Cambio en el volumen del cuerpo cerámico al eliminar humedad durante el secado. Los cambios dimensionales cesan una vez extraída el agua interparticular.

La rigidez y la resistencia de una pieza cerámica se obtienen durante su **horneado** o **quemado**. Durante el calentamiento, la arcilla se deshidrata, eliminando el agua que forma parte de la estructura cristalina de la caolinita y la vitrificación, es decir, se inicia la fusión (Fig. 14-20). Las impurezas y el fundente reaccionan con las partículas cerámicas (SiO_2) y la arcilla, produciendo una fase líquida de bajo punto de fusión en la superficie de los granos. El líquido

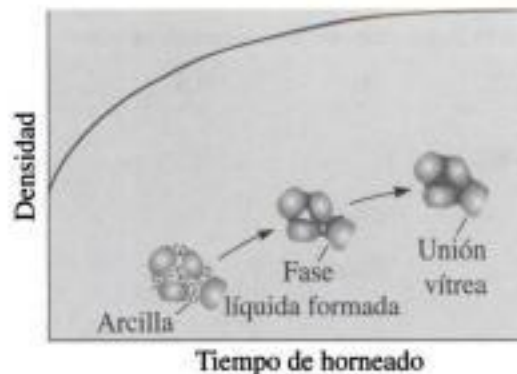


Figura 14-20

Durante el quemado u horneado, la arcilla y otros materiales fundentes reaccionan con partículas más gruesas para producir una unión vítrea y para reducir la porosidad.

ayuda a eliminar la porosidad y, después del enfriamiento, se convierte en un vidrio rígido que une las partículas cerámicas. Esta fase vítrea proporciona una **unión cerámica**, pero también causa una contracción adicional en todo el cuerpo cerámico.

El tamaño del grano de la pieza final lo determina principalmente el tamaño de las partículas originales. Además, conforme se incrementa el fundente, se reduce la temperatura de fusión, se forma más vidrio y los poros se hacen más redondos y pequeños. Un menor tamaño inicial de grano acelera este proceso al aportar más área superficial donde pueda ocurrir la vitrificación.

Aplicaciones de los productos de arcilla Muchos productos de arcilla estructurales y loza blanca se fabrican con estos procesos. Los ladrillos y las losas utilizadas en la construcción se presan o extruyen para darles forma, se secan y se queman para producir la unión cerámica. Las temperaturas de horneado más elevadas o los tamaños más finos de partículas originales producen una mayor vitrificación, menos porosidad y mayor densidad. La mayor densidad mejora las propiedades mecánicas, pero reduce las cualidades aisladoras de los ladrillos o de las losas.

Los productos de barro son formas de cerámica horneadas a temperaturas relativamente bajas. Se presenta poca vitrificación, la porosidad es muy elevada e interconectada y los materiales cerámicos de barro se pueden filtrar. En consecuencia, estos productos deben estar recubiertos con un vidriado impermeable.

A temperaturas más altas de horneado, con mayor vitrificación y menor porosidad, se produce el gres. El gres, que se utiliza para tuberías de drenaje y de aguas negras, contiene solo de 2% a 4% de porosidad. Los productos cerámicos conocidos como porcelana requieren temperaturas de horneado aún más elevadas para obtener una vitrificación completa sin porosidad alguna.

14-10 Refractarios

Los materiales refractarios son componentes importantes en el equipo que se utiliza para la producción, refinación y manejo de metales y de vidrios, para la construcción de hornos de tratamiento térmico y otros equipos de procesos a altas temperaturas. Los **refractarios** deben soportar altas temperaturas sin sufrir de corrosión o debilitamiento por el entorno circundante. Los refractarios comunes están compuestos de partículas gruesas de óxido unidas por un material refractario más fino. Este último se funde durante el horneado, proporcionando la unión. En algunos casos, los ladrillos refractarios tienen una porosidad aparente entre 20 y 25% con el objeto de obtener un mejor aislamiento térmico.

Los refractarios suelen clasificarse en tres grupos: ácido, básico y neutro, en función a su comportamiento químico (tabla 14-7).

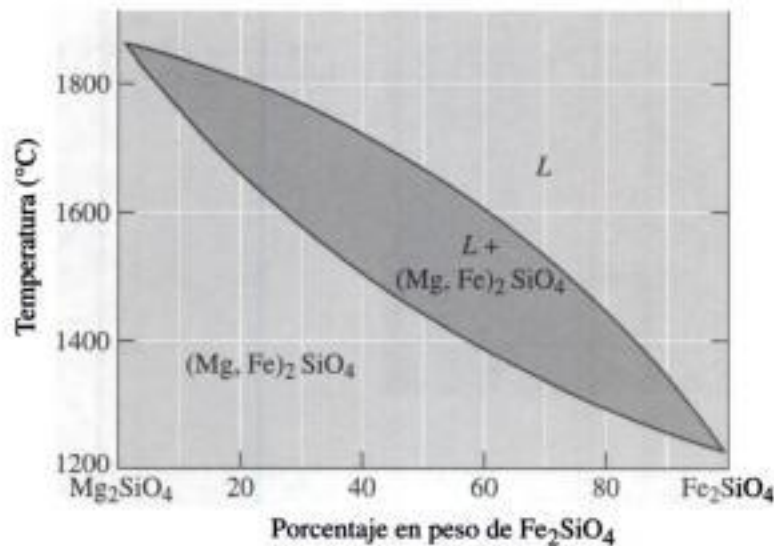


Figura 14-22 Diagrama de fases $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-Fe}_2\text{SiO}_4$ que muestra una solubilidad sólida completa.

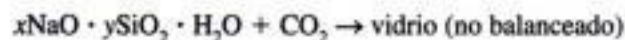
Refractarios neutros Estos refractarios, que incluyen la cromita y la cromita-magnesita, pueden utilizarse para separar refractarios básicos de los ácidos y evitar que se ataquen entre sí.

Refractarios especiales En muchas aplicaciones refractarias se utiliza el carbono o grafito, en particular cuando no está presente el oxígeno. Otros materiales refractarios son la zirconia (ZrO_2), el zircón ($\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$), así como una diversidad de nitruros, carburos y boruros. La mayoría de los carburos, como el TiC y el ZrC , no resisten bien la oxidación, y sus aplicaciones a altas temperaturas son más adecuadas en condiciones de reducción. Sin embargo, el carburo de silicio es una excepción; cuando se oxida el SiC a altas temperaturas, se forma en su superficie una delgada capa de SiO_2 que protege al SiC contra oxidación adicional hasta aproximadamente 1500°C . Los nitruros y los boruros también tienen elevadas temperaturas de fusión y son menos susceptibles a la oxidación. Algunos de los óxidos y de los nitruros son candidatos para uso en motores a reacción.

14-11 Otros materiales cerámicos

Además de su uso en la producción de materiales para la construcción, de aparatos domésticos, materiales estructurales y refractarios, los productos cerámicos encuentran una infinidad de aplicaciones, incluyendo las siguientes.

Cementos Las materias primas cerámicas se unen mediante un aglutinante sin necesidad de quemado o sinterizado, en un proceso conocido como **cementación**. Una reacción química convierte una resina líquida en un sólido que une las partículas. En el caso del silicato de sodio, la introducción del gas CO_2 actúa como catalizador para deshidratar la solución de silicato de sodio formando un material vítreo:



La figura 14-23 muestra los granos de arena sílice utilizados en la fundición de metales para producir moldes. El silicato de sodio líquido recubre los granos de arena proporcionando puentes entre los mismos. La introducción de CO_2 convierte los puentes en un sólido, uniendo a los granos.

Prensado isostático en caliente (HIP, *hot isostatic pressing*) Técnica de procesamiento de polvos en la cual se pueden producir grandes piezas de metales, aleaciones y cerámicos utilizando el sinterizado bajo una presión hidrostática generada por un gas.

Prensado isostático en frío (CIP) Técnica de conformación de polvos en la cual, durante la compactación, se aplica presión hidrostática. Se utiliza para lograr una densidad más elevada de cerámicos en verde o mejor compactación de formas más complejas.

Procesamiento de los polvos Operaciones unitarias que se llevan a cabo para convertir los polvos en formas útiles (por ejemplo, prensado, moldeo en cinta, etc.).

Proceso sol-gel Método que utiliza un sol (dispersión de partículas o moléculas coloidales) que se convierte en un gel y finalmente en un producto útil, como por ejemplo, una película delgada, polvos o una pieza cerámica porosa y monolítica. Las partículas metalorgánicas poliméricas o de óxido coloidal (hidróxido) se utilizan para generar componentes de materiales cerámicos individuales o múltiples a bajas temperaturas.

Refractarios Grupo de materiales cerámicos capaces de soportar elevadas temperaturas durante prolongados periodos.

Secado por atomización Se rocía un lodo de polvos cerámicos en una cámara espaciosa en presencia de aire caliente. Esto conduce a la formación de aglomerados blandos que pueden fluir con facilidad en los moldes utilizados durante la compactación de polvos.

Síntesis Etapas conducentes a la elaboración de un polvo cerámico.

Temperatura de vitrificación Temperatura por debajo de la cual un líquido subenfriado se convierte en un vidrio.

Unión cerámica Aglutinamiento de materiales cerámicos que permite la formación de un producto vítreo a elevadas temperaturas de horneado.

Unión o consolidación por reacción Técnica de procesamiento de materiales cerámicos mediante la cual se les da una forma utilizando un material que posteriormente se transforma en un material cerámico gracias a una reacción con un gas.

Vidriado Recubrimiento cerámico aplicado al vidrio. El vidriado contiene fases vitrocerámicas y cristalinas.

Vidrio Material inorgánico amorfo que se obtiene al enfriar un material cerámico fundido.

Vidrio laminado Vidrio recocido con un polímero (por ejemplo, butiral polivinil, *PVB*) emparedado entre dos vidrios y que se utiliza en los parabrisas de los automóviles.

Vidrio templado Vidrio de alta resistencia que tiene una capa superficial donde el esfuerzo es a la compresión, mismo que ha sido inducido térmicamente durante el enfriamiento o mediante la difusión química de iones.

Vitrificación Fusión, o formación de un vidrio.

1. BRONOWSKI, J. *The Ascent of Man*, Back Bay Books, 1973, pp. 124-131.
2. HÖLAND, W. y G.H. BEALL. *Glass-Ceramic Technology*, American Ceramic Society, 2002.
3. BERGERON, C.G. y S.H. RISBUD. *Introduction to Phase Equilibria*, American Ceramic Society, 1984.
4. BENGISU, M. *Engineering Ceramics*, Springer Verlag, 2001.
5. HARPER, C.A. *Handbook of Materials Product Design*, 3a. ed., McGraw Hill, 2001.
6. MEYERS, M.A. y K.K. CHAWLA, *Mechanical Behavior of Materials*, Prentice Hall, 1998.
7. DOWLING, N.E. *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*, 2a. ed., Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall, 1999.

8. CHEN, I.W. "Superplasticity in Ceramic Systems", *Encyclopedia of Advanced Materials*, D.B. BLOTT, R.J., FLEMINGS, M.C. y MAHAJAN, S., eds., 1994, pp. 2715-2717.
9. GREENBERG, CHARLES. PPG Industries, *Se reconocen las discusiones técnicas*, 2002.
10. REED, J.S. *Principles of Ceramics Processing*, 2a. ed., John Wiley and Sons, 1995.
11. RICHESON, D.W. *Modern Ceramic Engineering*, Dekker, 1992.
12. MHAISALKAR, S. y D.W. READY. *Comunicación Personal*, 1989.
13. YOUNG, C. y B. DUGAN. *Zinc Corporation of America. Se reconocen la asistencia y las discusiones técnicas*, 2002.
14. STEVENS, R. *Zirconia and Zirconia Ceramics*, 2a. ed., Magnesium Elektron, Ltd., 1986.
15. NETTLESHIP, I. y R. STEVENS. "Tetragonal Zirconia Polycrystal (TZP)—A Review", *Int. J. High Technol. Ceram.* 3(1), 1987, pp. 1-32.
16. PHULÉ, P.P. y S.H. RISBUD. "Synthesis of Ceramics in the BaO-TiO₂ System", *Journal of Materials Science*, 1990.
17. PHULÉ, P.P. y T. WOOD. "Sol-Gel Processing of Ceramics", *Encyclopedia of Advanced Materials*, M. FLEMINGS, ed., Pergamon, 2001.
18. CHIANG, Y.M., D. BIRNIE y W.D. KINGERY. *Physical Ceramics: Principles for Ceramic Science and Engineering*, Wiley, 1997.
19. BARSOUM, M. *Fundamentals of Ceramics*, McGraw Hill, 1997.
20. WILKISON, D.S. y M.F. ASHBY. *Sintering and Catalysis*, G.C. KUCZYNSKI, ed., Nueva York, Plenum, 1976, p. 476.
21. MISTLER, R.E. y E.R. TWINAME. *Tape Casting: Theory and Practice*, American Ceramic Society, 2002.
22. LEE, H., RISBUD, S.H. et al. "Quantum Confined Electron-Hole States in ZnSe Quantum Dots", *Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 571, Semiconductor Quantum Dots*, 2000.
23. STOOKEY, DONALD. "Profiles in Ceramics", *Ceramic Bulletin*, 2001.
24. GREENBERG, C. *Se reconocen las discusiones sobre cristales con autolimpiado y del uso de recubrimientos*, 2002.
25. REIMANIS, I., C.J. HENAGER y A. TOMSIA. "Ceramic Joining Ceramic Transactions, vol. 77", *Proceedings of the Ceramic Joining Symposium at the 98th Annual Meeting of the American Ceramic Society*, Indianapolis, Indiana, American Ceramic Society, 1996.
26. YINNON, H., D.R. UHLMANN y N.J. KRIDEL. Eds., *Glass-Science and Technology*, vol. 1, Academic Press, 1983.

✓ PROBLEMAS

Sección 14-1 Aplicaciones de los materiales cerámicos

- | | |
|--|---|
| <p>14-1 ¿Cuáles son los tipos principales de enlaces atómicos en los materiales cerámicos?</p> <p>14-2 Explique el significado de los siguientes términos: material cerámico, vidrios inorgánicos y materiales vitrocerámicos.</p> <p>14-3 Explique la razón por la cual comúnmente los materiales cerámicos se procesan en forma de polvos. ¿En qué difiere o en qué se parece lo anterior al procesamiento de los metales?</p> | <p>14-4 ¿Qué significan los términos "vidriado" y "esmalte"?</p> <p>14-5 ¿Qué material se utiliza para la fabricación de las losas que le dan protección térmica al transbordador espacial de la NASA?</p> <p>14-6 ¿Cuáles son los materiales cerámicos de mayor uso?</p> <p>14-7 Explique las diferentes formas en que pueden clasificarse los materiales cerámicos.</p> <p>14-8 Escriba alguna aplicación para los materiales cerámicos siguientes: (a) alúmina, (b) sílice, (c) titanato de bario, (d) zirconia, (e) carburo de boro y (f) diamante.</p> |
|--|---|

- 14-9 ¿Qué es un material piezoeléctrico? Dé un ejemplo de un material cerámico piezoeléctrico, incluyendo algunas aplicaciones.
- 14-10 Escriba aplicaciones de la sílice en forma de fibra y como partícula fina.
- 14-11 ¿Qué es el sialón? ¿Para qué se utiliza el WC-Co? ¿Qué papeles desempeñan el WC y el Co?
- 14-12 ¿Cuáles son algunas aplicaciones de los materiales cerámicos magnéticos?
- 14-13 ¿De qué manera funciona la zirconia como sensor para medir el oxígeno en el escape de un automóvil o en el acero fundido?

Sección 14-2 Propiedades de los materiales cerámicos

- 14-14 ¿Cuáles son algunas de las características comunes de los materiales cerámicos?
- 14-15 ¿Por qué la resistencia a la tensión de los materiales cerámicos es mucho menor que la resistencia a la compresión?
- 14-16 En los metales es importante la deformación plástica debida a los movimientos de dislocaciones; sin embargo, lo anterior no es una consideración de importancia para las propiedades de los materiales cerámicos y de los vidrios. Explique.
- 14-17 ¿Pueden los materiales cerámicos mostrar un comportamiento superplástico o en todos los casos son materiales frágiles? Explique.
- 14-18 Explique por qué la resistencia de los materiales cerámicos tiende a mostrar una dispersión amplia en sus propiedades mecánicas.

Sección 14-3 Síntesis de los polvos cerámicos

- 14-19 Explique el papel que desempeñan el triturado y el molido en la síntesis de los polvos cerámicos.
- 14-20 ¿Qué es molido con bolas? Explique utilizando un esquema.
- 14-21 Para el molido en molino de bolas de una ferrita de níquel-zinc, se utilizan esferas de acero como medio molidor. Sin embargo, para moler los polvos de BaTiO_3 se utilizan esferas de zirconia. Explique por qué es así.
- 14-22 ¿Qué significa el término "lixiviación"?
- 14-23 ¿Qué es la calcinación?
- 14-24 ¿De qué manera se elaboran los siguientes polvos cerámicos? (a) Alúmina, (b) bióxido de titanio, (c) bióxido de zirconio y (d) óxido de zinc.
- 14-25 Se desea utilizar alúmina para fabricar bujías. Si se supone que la alúmina está hecha utilizando el proceso Bayer, ¿Cuál sería la impureza que le preocuparía más? Explique.
- 14-26 Compare los procesos químicos y convencionales (mezcla de óxidos) para la manufactura de los polvos cerámicos.

- 14-27 Un fabricante de material cerámico PZT desea elaborar 500 kg de polvo cerámico $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.4}\text{Ti}_{0.6})\text{O}_3$. ¿Cuánto necesitará de PbO , ZrO_2 y TiO_2 ? Suponga que estos precursores no contienen impurezas.

- 14-28 El titanato de bario puede prepararse utilizando un proceso hidrotérmico en el cual se hace reaccionar el TiO_2 con iones bario en una solución alcalina con $\text{pH} \sim 10$. Suponiendo que en la solución acuosa existe un suministro prácticamente ilimitado de Ba^{+2} , ¿cuánto TiO_2 se necesitaría para elaborar 10 kilogramos de BaTiO_3 hidrotérmico? Suponga que la reacción siguiente conduce a la formación del BaTiO_3 hidrotérmico.



- 14-29 Explique cómo se podrían fabricar polvos de zirconio estabilizados con itrio utilizando el proceso de secado por congelamiento (si necesita ayuda, consulte el capítulo 9).

Sección 14-4 Procesamiento de los polvos

- 14-30 ¿Cuál es la principal ventaja del sinterizado?
- 14-31 ¿Cuál es la principal ventaja del crecimiento de granos?
- 14-32 ¿Cuáles son los mecanismos de difusión que desempeñan el papel de mayor importancia en el sinterizado en estado sólido de los materiales cerámicos?
- 14-33 ¿Qué significa sinterizado en fase líquida?
- 14-34 Explique el uso de los siguientes procesos (utilice un esquema cuando sea necesario): (a) compactación y sinterizado uniaxial, (b) prensado en caliente, (c) prensado isostático en caliente (HIP) y (d) moldeo en cinta.
- 14-35 ¿Cuáles son las aplicaciones del moldeo por escurrimiento y del moldeo en cinta?
- 14-36 ¿Cuál es la razón por la que frecuentemente es necesario controlar la atmósfera utilizada en el sinterizado de los materiales cerámicos?

Sección 14-5 Características de los materiales cerámicos sinterizados

- 14-37 ¿Cuáles son algunas de las características de importancia de los materiales cerámicos sinterizados?
- 14-38 Para la observación del tamaño de grano de los materiales metálicos, es posible atacar químicamente los bordes de grano mediante ácidos y álcalis. Sin embargo, esto es difícil de lograr para los materiales cerámicos. Explique la forma en que se pueden utilizar el pulido, el rectificado y la exposición subsecuente a una alta temperatura para afectar la microestructura superficial de los materiales cerámicos. (Nota: esta técnica se conoce como ranurado térmico o grabado térmico.)
- 14-39 ¿Qué niveles comunes de densidad se obtienen en los materiales cerámicos sinterizados?
- 14-40 Para la fabricación de dispositivos eléctricos de protección contra oscilaciones se utiliza el óxido de zinc. Un fabricante de óxido de zinc está evaluando varios polvos de ZnO . La empresa llega a la conclusión de que el

polvo de ZnO inicial tiene un tamaño de $\sim 1 \mu\text{m}$. Para la fabricación de los dispositivos eléctricos de protección contra oscilaciones, se agregan pequeñas cantidades de óxido de bismuto, óxido de antimonio, así como otros óxidos. El tamaño promedio de grano del material cerámico sinterizado es $\sim 30 \mu\text{m}$. ¿Qué se puede deducir respecto al posible mecanismo de sinterizado?

- 14-41 ¿Cuál es el significado de los términos “porosidad aparente” y “porosidad real”?
- 14-42 La gravedad específica del Al_2O_3 es 3.96 g/cm^3 . Mediante el sinterizado del polvo de alúmina se produce una pieza cerámica. Cuando está seca, pesa 80 g; cuando está empapada de agua, 92 g; cuando está suspendida en el agua, 58 g. Calcule la porosidad aparente, la porosidad real y los poros cerrados.
- 14-43 El carburo de silicio (SiC) tiene una gravedad específica de 3.1 g/cm^3 . Se produce una pieza de SiC sinterizada, que ocupa un volumen de 500 cm^3 y que pesa 1200 g. Después de sumergirse en agua, la pieza pesa 1250 g. Calcule la densidad volumétrica, la porosidad real y la fracción volumétrica de la porosidad total que corresponde a poros cerrados.
- 14-44 Explique cómo se pueden utilizar las esponjas poliméricas (parecidas al Styrofoam™) para la fabricación de esponjas cerámicas que puedan ser utilizadas para el filtrado de metales fundidos.

Sección 14-6 Vidrios inorgánicos

Sección 14-7 Procesos y aplicaciones de los vidrios

- 14-45 ¿Cuál es la razón principal por la que el vidrio se forma fácilmente en sistemas de silicatos?
- 14-46 ¿Pueden formarse vidrios utilizando materiales metálicos?
- 14-47 Defina los términos “formadores de vidrio”, “intermedios” y “modificadores”

- 14-48 ¿Qué significa “temperatura de vitrificación”? Para una composición dada de vidrio, ¿es fija esta temperatura?
- 14-49 Explique el proceso de vidrio flotado.
- 14-50 ¿Cuál es el papel que desempeñan la sosa y la cal en un vidrio de sosa-cal?
- 14-51 Explique cómo se utilizan la separación de fases y la inmiscibilidad metaestable para fabricar vidrio Vycor™ (vea los comentarios anteriores de los capítulos 9 a 12).
- 14-52 Hablando químicamente, ¿qué es un vidrio Pyrex™? ¿Para qué se utiliza?
- 14-53 ¿Qué representa la E en un vidrio E ? ¿Qué representa la letra S en un vidrio S ? ¿Para qué se utilizan los vidrios E y S ?
- 14-54 Calcule la relación O:Si cuando al SiO_2 se le agregan 20% por peso de Na_2O . Diga si el material proporcionará buenas tendencias de formación de vidrios. ¿Por encima de qué temperatura deberá calentarse este material cerámico para que se haga todo líquido?
- 14-55 ¿Cuántos gramos de BaO pueden agregarse a 1 kg de SiO_2 antes de que la relación O:Si exceda 2.5 y se reduzcan las tendencias de formación de vidrios? Compare lo anterior con el caso en el cual se le agrega Li_2O al SiO_2 .
- 14-56 Calcule la relación O:Si cuando se agregan al SiO_2 30% en peso de Y_2O_3 . ¿Proporcionará este material buenas tendencias de formación de vidrios?
- 14-57 El plomo se puede incorporar en un vidrio, ya sea como PbO (donde el Pb presenta una valencia de +2) o como PbO_2 (donde el Pb presenta una valencia de +4). Estos vidrios con plomo se utilizan para elaborar lo que comercialmente se vende como “vidrio cristal” para cristalería de mesa. Estos vidrios también se usan para fabricar vidrios para las pantallas de televisión y de computadora de rayos catódicos.

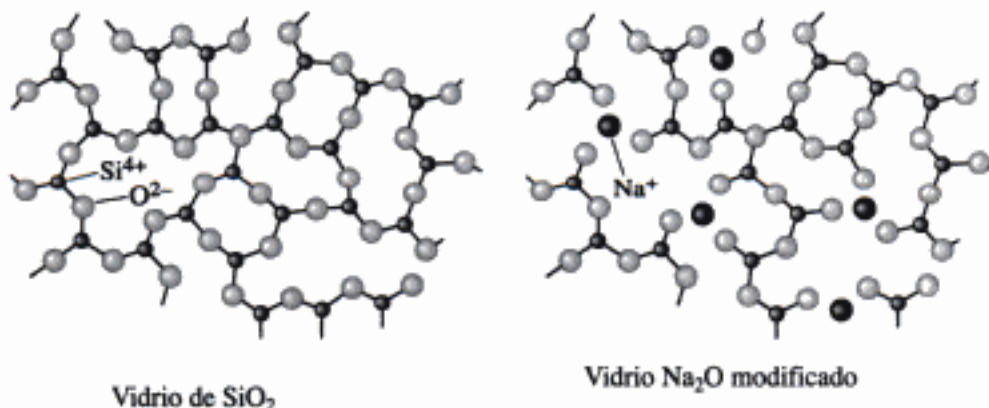


Figura 14-10 (Repetida para el problema 14-57). Efecto del Na_2O en la red del vidrio de sílice. El óxido de sodio es un modificador que desorganiza la red vítrea y reduce la capacidad de formación de vidrio.

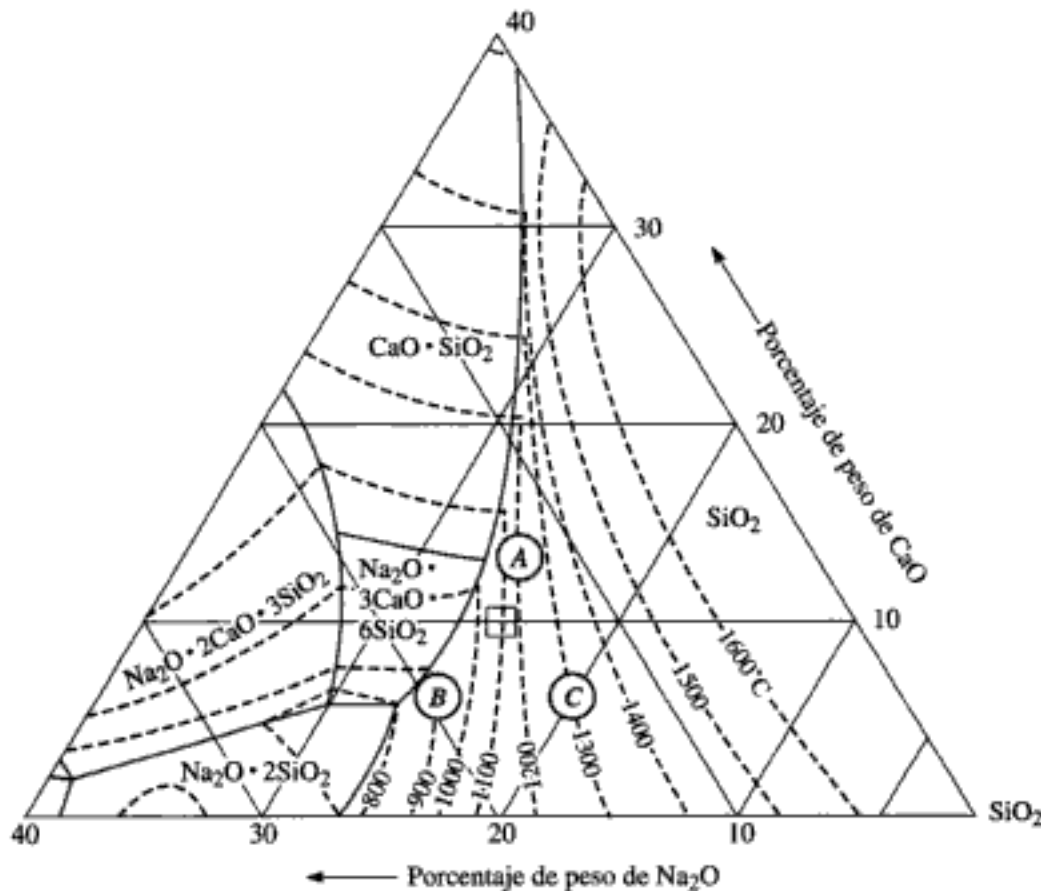


Figura 14-16 (Repetida para el problema 14-58). Trazo del liquidus para el diagrama de fases del SiO_2 - CaO - Na_2O .

Dibuje un esquema (similar al de la figura 14-10) que muestre el efecto de cada uno de estos óxidos sobre la red cristalina de silicatos. ¿Cuál de los óxidos es un modificador y cuál un intermedio?

- 14-58 Se elabora un vidrio compuesto de 65 mol% SiO_2 , 20 mol% CaO y 15 mol% Na_2O . Calcule la relación O:Si y determine si el material tiene buenas tendencias de formación de vidrios. Utilizando la figura 14-16, estime la temperatura de liquidus del material.

Sección 14-8 Materiales vitrocerámicos

- 14-59 ¿En qué difiere un material vitrocerámico de un vidrio y de un material cerámico?
- 14-60 ¿Cuáles son las ventajas del uso de materiales vitrocerámicos en comparación ya sea con vidrios o con materiales cerámicos?
- 14-61 ¿Cuál es el papel de la nucleación heterogénea y la separación de fases en la formación de los materiales vitrocerámicos?
- 14-62 Dibuje el perfil común de tratamiento térmico que se utiliza en el procesamiento de los materiales vitrocerámicos.

- 14-63 Compare la cinética de la cristalización del vidrio con las curvas TTT y CCT que se encuentran en el tratamiento térmico de los aceros.

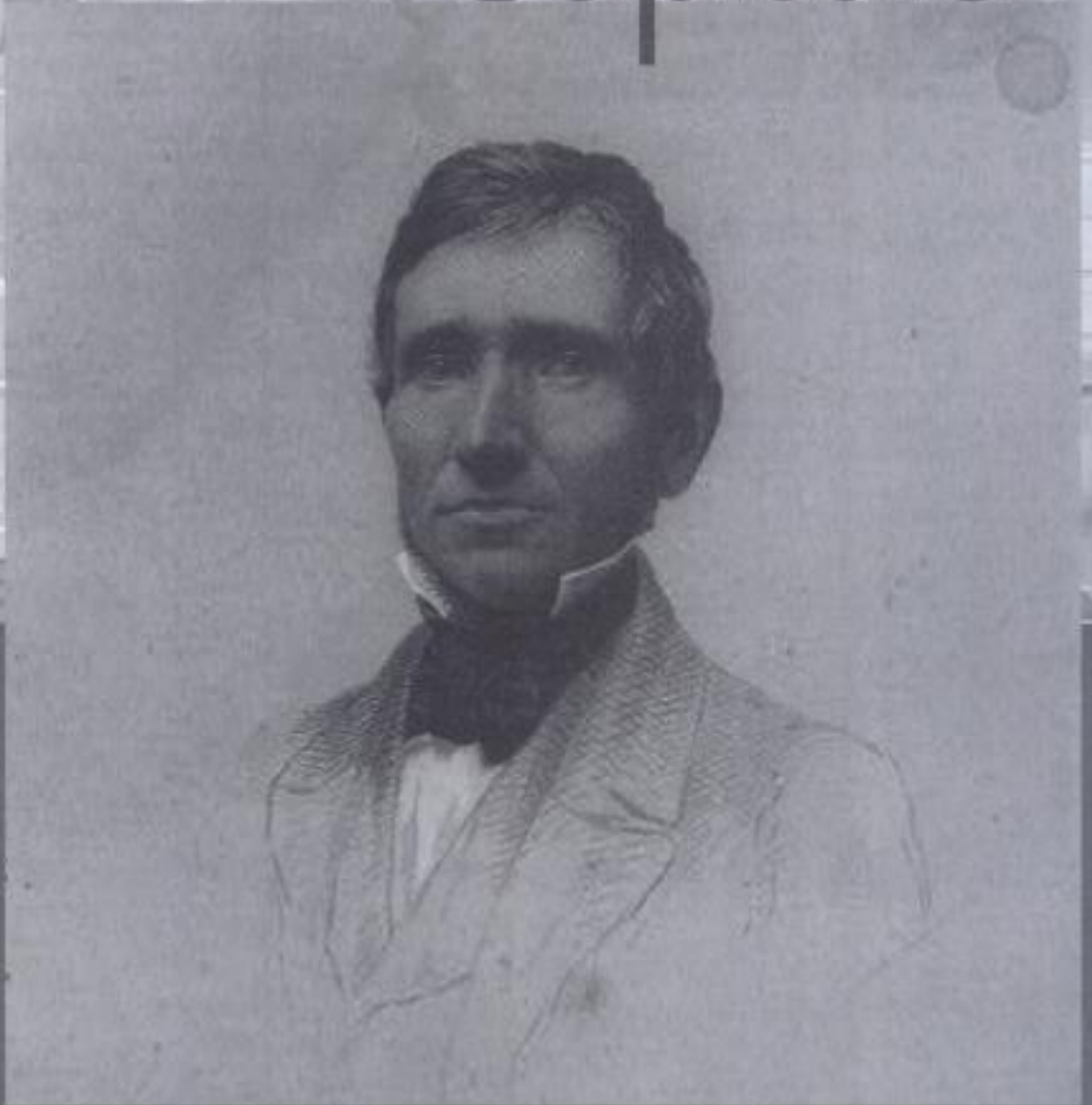
- 14-64 ¿Cuáles son algunas de las aplicaciones más importantes de los materiales vitrocerámicos?

Sección 14-11 Otros materiales cerámicos

- 14-65 En el moldeo en cinta y en el de inyección se utilizan moléculas de polímeros como aglutinantes. En el caso de las arcillas, ¿cuál es el aglutinante?
- 14-66 ¿Cuáles son algunas de las aplicaciones de los productos de arcilla?
- 14-67 ¿Qué tipos diferentes de refractarios se utilizan en la manufactura de los metales?
- 14-68 ¿Qué es un cemento?
- 14-69 ¿Qué papel desempeña el recubrimiento de zirconia estabilizada con itrio (YSZ, *yttria stabilized zirconia*) que se utiliza en ciertas aspas de turbina? ¿Cuál es la razón por la que es menester "estabilizar" la zirconia?

By Arkanosant...

Capítulo



Los polímeros se usan en un increíble abanico de tecnologías, incluyendo la industria automotriz, la microelectrónica y los materiales compuestos. Esta fotografía es de Charles Goodyear, quien inventó el proceso de vulcanización. Igual que en otros sucesos muy importantes en la historia de la ciencia y la tecnología, la suerte y la buena fortuna representaron un papel clave en esta invención. (Cortesía de Goodyear Inc.)

Polímeros

¿Alguna vez se preguntó...

- ...de qué están hechos los discos compactos (CD)?
- ...quién fue Charles Goodyear?
- ...de qué está hecha la masa Silly Putty®?
- ...qué polímero se utiliza en la goma de mascar (chicle)?
- ...cuál fue la primera fibra sintética fabricada?
- ...por qué algunos materiales plásticos son "a prueba de lavavajillas" y otros no?
- ...de qué están fabricados los chalecos a prueba de balas?
- ...por qué las cuerdas de nylon de las raquetas de tenis se estiran al colocarlas para obtener una tensión más alta que la que finalmente se desea?
- ...cuál es el polímero utilizado en los enseres de cocina antiadherentes?

El sufijo *mero* significa una "unidad". En este contexto el término *mero* se refiere a un grupo unitario de átomos o moléculas que define un arreglo característico para un polímero. Un polímero es un material constituido al combinar varios meros o unidades. Los polímeros son materiales que consisten en moléculas gigantes o macromoléculas en cadena con pesos moleculares promedio

de 10 000 a más de 1 000 000 g/mol y que se forman al unir muchos meros o unidades mediante enlace químico. Se define el peso molecular como la suma de las masas atómicas en cada molécula. La mayoría de los polímeros, sólidos o líquidos, son orgánicos basados en el carbono; sin embargo, también pueden ser inorgánicos (por ejemplo, siliconas basadas en una red Si-O).

Los **plásticos** son materiales compuestos principalmente de polímeros de origen natural y modificados o de polímeros hechos artificialmente que a veces contienen aditivos como fibras, cargas, pigmentos y otros similares que mejoran aún más sus propiedades.[1] Entre los plásticos, encontramos los termoplásticos (como materia prima o material de ingeniería), los termoestables y los elastómeros (naturales o sintéticos). En este libro, utilizamos los términos *plásticos* y *polímeros* de manera intercambiable. La *polimerización* es el proceso mediante el cual pequeñas moléculas de una sola unidad (conocidas como **monómeros**) o de unas cuantas unidades (**oligómeros**) se unen químicamente para crear moléculas gigantes. Por lo común, la polimerización comienza con la producción de largas cadenas en las cuales los átomos están fuertemente unidos mediante un enlace covalente. Los plásticos se utilizan en una increíble cantidad de aplicaciones, incluyendo prendas de vestir, juguetes, enseres domésticos, elementos estructurales y decorativos, recubrimientos, pinturas, adhesivos, neumáticos para automóvil, materiales biomédicos, defensas e interiores para automóvil, espumas y empaques. Los polímeros se utilizan con frecuencia en materiales compuestos, tanto en forma de fibras como para la matriz. Las pantallas de cristal líquido (LCD, por sus siglas en inglés) se fabrican a base de polímeros.[2] También utilizamos polímeros en los lentes fotocromáticos. Los plásticos también se usan para fabricar componentes electrónicos debido a su capacidad aislante y a su constante dieléctrica baja. Recientemente, se han logrado adelantos significativos en el área de dispositivos electrónicos flexibles basados en las propiedades útiles de piezoelectricidad, semiconductividad, óptica y electroóptica que se encuentran en algunos polímeros.[3] Los polímeros como el acetato de polivinilo (PVA, de *polyvinyl acetate*) son solubles

en el agua. Muchos de estos polímeros se pueden disolver en agua o en solventes orgánicos para utilizarse como aglutinantes, surfactantes o plastificantes en el procesamiento de los materiales cerámicos, los semiconductores y como aditivo para muchos productos de consumo. El butiral polivinilo (PVB, de *polyvinyl butyral*), un polímero, forma parte de los vidrios laminados que se utilizan en los parabrisas de los automóviles. Posiblemente los polímeros se utilizan en más áreas tecnológicas que cualquier otra clase de materiales.

Los *polímeros comerciales*, es decir, *materias primas estándar* son materiales ligeros, resistentes a la corrosión de baja resistencia y rigidez, y no son adecuados para ser utilizados a elevadas temperaturas. Sin embargo, estos polímeros son relativamente económicos y se pueden moldear fácilmente en una diversidad de formas, desde bolsas de plástico o engranes mecánicos hasta tinas de baño. Los *polímeros de ingeniería* están diseñados para dar una mejor resistencia o un mayor rendimiento a temperaturas elevadas. Estos materiales se producen en cantidades relativamente pequeñas y suelen ser costosos. Algunos de los polímeros de ingeniería pueden funcionar a temperaturas tan altas como 350 °C; otros, usualmente como fibras, tienen resistencias superiores a las del acero.

Los polímeros también tienen muchas propiedades físicas útiles. Algunos, como, por ejemplo, los acrílicos como el Plexiglas™ y la Lucite™ son transparentes y pueden reemplazar al vidrio. Aunque la mayoría de los polímeros son aislantes eléctricos, ciertos polímeros especiales (como son los acetales) y los materiales compuestos base polímero poseen una conductividad eléctrica útil. El Teflón™ tiene un bajo coeficiente de fricción y es el recubrimiento utilizado en los utensilios de cocina antiadherentes. Igualmente, los polímeros resisten la corrosión y el ataque químico.

15-1

Clasificación de los polímeros

Los polímeros se clasifican de varias formas distintas: según la síntesis de sus moléculas, según su estructura molecular o de acuerdo con la familia química a la que pertenecen. Una manera de clasificar a los polímeros es establecer si se trata de un **polímero lineal** o de un **polímero ramificado** (Fig. 15-1). Un polímero lineal está formado de cadenas moleculares en forma de espagueti. En un polímero ramificado hay cadenas primarias de polímero y cadenas

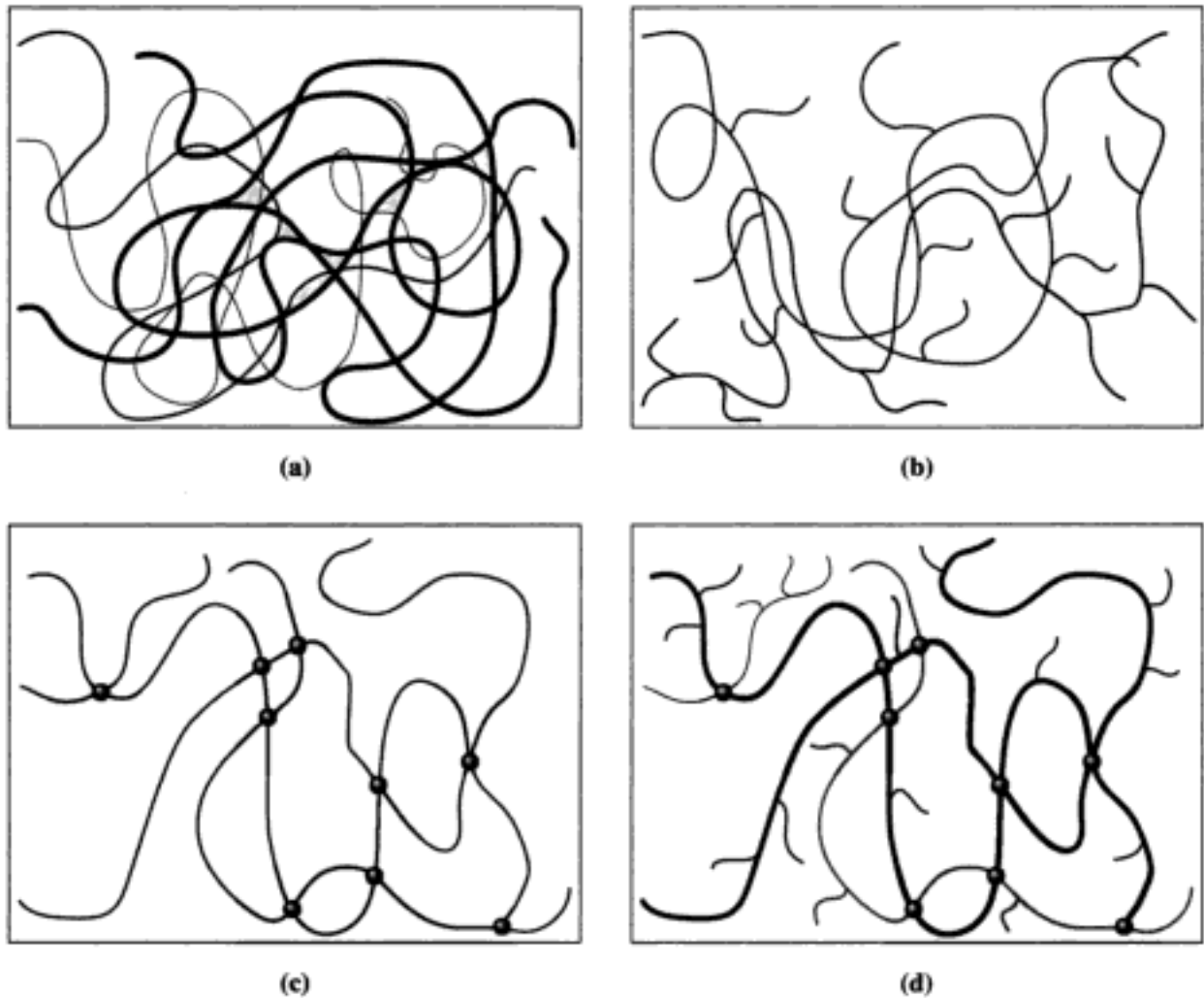


Figura 15-1 Esquema que muestra polímeros lineales y ramificados. Nótese que la ramificación puede ocurrir en cualquier tipo de polímero (por ejemplo, termoplásticos, termoestables y elastómeros). (a) Polímero lineal no ramificado: obsérvese que las cadenas no forman líneas rectas y no están conectadas. Se muestran diferentes cadenas poliméricas mediante diferentes tonos y diseños para mostrar claramente que cada una de las cadenas no está conectada con otra. (b) Polímero lineal ramificado: las cadenas no están conectadas; sin embargo, tienen ramificaciones. (c) Polímero termoestable sin ramificación: las cadenas están conectadas entre sí mediante enlaces covalentes, pero no tienen ramificación. Los puntos de unión resaltan mediante círculos rellenos. (d) Polímero termoestable que tiene ramificación y cadenas interconectadas mediante enlaces covalentes. Las distintas cadenas y ramificaciones aparecen en diferentes tonos para distinguirlas con mayor claridad. Los sitios donde las cadenas están realmente enlazadas aparecen con círculos rellenos.

más pequeñas secundarias (ramales) que nacen de las cadenas principales. Observe que, aun cuando decimos "lineales", en realidad las cadenas no tienen forma de líneas rectas. Una mejor manera de describir los polímeros es en función de su comportamiento mecánico y térmico. En la tabla 15-1 se comparan las tres categorías principales de polímeros.

Los termoplásticos están formados de largas cadenas producidas al unir los monómeros; comúnmente se comportan de una manera plástica y dúctil. Las cadenas pueden o no estar ramificadas. Las cadenas individuales están entrelazadas. Entre los átomos de cadenas diferentes existen enlaces de van der Waals relativamente débiles. Esto es algo similar a cuando unos cuantos árboles que están agrupados. Los árboles pueden o no tener ramas, cada uno de

ellos es independiente y no está conectado con ningún otro. En los termoplásticos las cadenas se pueden desenlazar mediante la aplicación de un esfuerzo a la tensión. Los termoplásticos pueden ser amorfos o cristalinos. Al calentarse se ablandan y se funden. Se procesan en ciertas formas calentándolos a temperaturas elevadas. Los termoplásticos se pueden reciclar fácilmente.

Los **polímeros termoestables** están constituidos por largas cadenas (lineales o ramificadas) de moléculas que están fuertemente unidas por enlaces cruzados (entrelazados) para formar estructuras de redes tridimensionales. Los polímeros de red o termoestables se parecen a un manojo de hilos que están tejidos entre sí en varios sitios y no sólo enmarañados. Los termoestables por lo general son más resistentes, aunque más frágiles que los termoplásticos. Los termoestables no se funden al calentarse, sino que empiezan a desintegrarse. No son fáciles de reprocesar después de que las reacciones de enlaces cruzados han tenido lugar y, por tanto, su reciclaje es difícil.

Elastómeros éstos se conocen como hules. Tienen una deformación elástica >200%. Es posible que se trate de termoplásticos o de termoestables ligeramente entrelazados. Las cadenas poliméricas tienen forma de moléculas en espiral que se pueden estirar de manera reversible al aplicárseles una fuerza.

Los **elastómeros termoplásticos** son un grupo especial de polímeros; tienen la facilidad de procesamiento de los termoplásticos y el comportamiento elástico de los elastómeros.

TABLA 15-1 ■ Comparación de las tres categorías principales de polímeros

Comportamiento	Estructura general	Ejemplo
Termoplástico	Cadenas lineales flexibles (sin o con ramificación)	Polietileno
Termoestables	Red tridimensional rígida (las cadenas pueden ser lineales o ramificadas)	Poliuretanos
Elastómeros	Termoplásticos o termoestables ligeramente entrelazados, en forma de moléculas en espiral	Hule natural

Estructuras representativas La figura 15-2 muestra tres maneras en que podemos representar un segmento de polietileno, el más simple de los termoplásticos. La cadena polimérica está formada de una "columna vertebral", o cadena principal, de átomos de carbono; dos átomos de hidrógeno están enlazados a cada uno de los átomos de carbono de la cadena. La cadena se tuerce y gira a través del espacio. En la figura, el polietileno no muestra ramificaciones; por tanto, se trata de un termoplástico lineal. El modelo simple en dos dimensiones de la figura 15-2(c) incluye los elementos esenciales de la estructura del polímero y se utilizará para describir los diversos polímeros. Las líneas sencillas (—) entre átomos de carbono y entre átomos de carbono e hidrógeno representan un enlace covalente simple. Dos líneas paralelas (==) representan enlaces covalentes dobles entre átomos. Varios polímeros tienen estructuras en anillo, como el anillo de benceno, que se encuentra en el poliestireno y en otros polímeros (Fig. 15-3).

En la estructura que aparece en la figura 15-2(c), si reemplazamos uno de los átomos de hidrógeno en CH_2 con (CH_3) , un anillo de benceno, o cloro, obtenemos la estructura del polipropileno, del poliestireno y del cloruro de polivinilo (PVC). Si en los grupos CH_2 sustituyéramos todas las H por flúor (F), obtendríamos la estructura del politetrafluoretileno, es decir Teflón™. Igual que en muchos otros descubrimientos, el Teflón™ también fue descubierto accidentalmente.[4,5] Muchas estructuras poliméricas pueden derivarse a partir de la estructura del polietileno. El siguiente ejemplo muestra la manera en que se utilizan los diferentes tipos de polímeros.

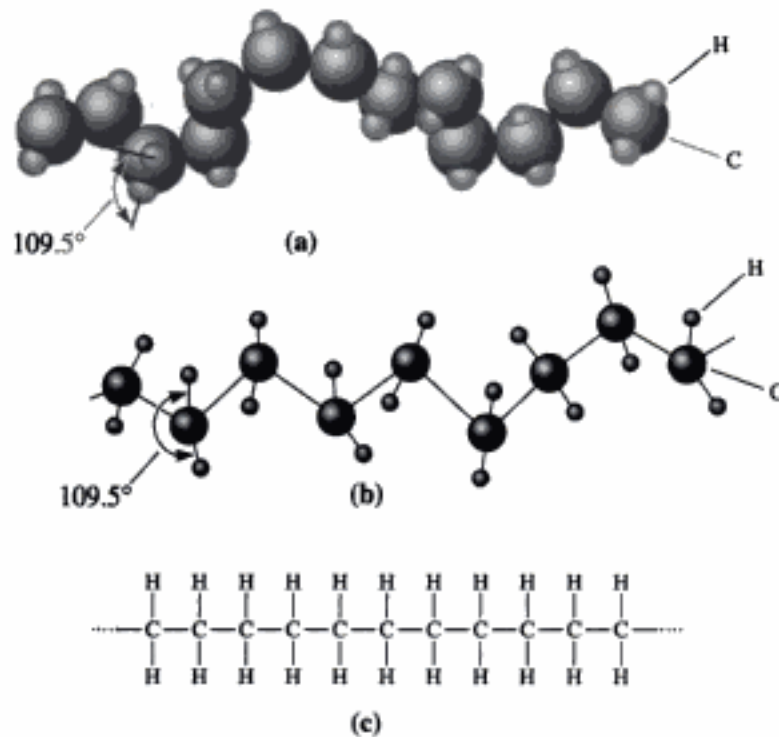


Figura 15-2 Tres formas de representar la estructura del polietileno: (a) un modelo tridimensional sólido, (b) un modelo tridimensional "espacial" y (c) un modelo bidimensional simple.

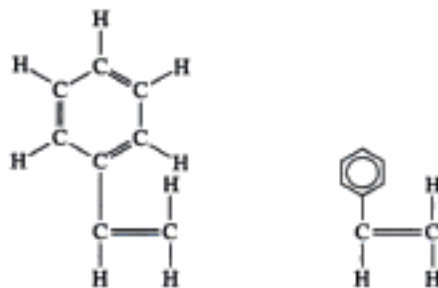


Figura 15-3
Dos formas de representar el anillo de benceno. En este caso, el anillo aparece conectado a un par de átomos de carbono, produciendo el estireno.

EJEMPLO 15-1

Diseño y selección de materiales para componentes poliméricos

Diseñe el tipo de material polimérico que seleccionaría para las siguientes aplicaciones: guantes para cirugía, un envase para bebidas y una polea.

SOLUCIÓN

El guante debe poder estirarse mucho, a fin de deslizarse en la mano del cirujano y, al mismo tiempo, debe seguir con fidelidad el contorno de la mano para permitir el máximo de sensación táctil durante la cirugía. Un material con grandes deformaciones elásticas, en particular ante un esfuerzo aplicado relativamente pequeño, puede resultar apropiado; este requisito describe a un elastómero.

El envase para bebidas debe fabricarse fácil y económicamente. Debe tener cierta ductilidad y tenacidad a fin de que no se rompa y deje salir el contenido. Si la bebida es gaseosa, una preocupación importante sería la difusión del CO_2 (capítulo 5). Un termoplástico, como, por ejemplo, de tereftalato de polietileno (PET), tendrá la ductilidad y formabilidad necesaria para esta aplicación.

La polea deberá estar sujeta a algún esfuerzo y desgaste conforme la banda pasa por encima. Se requiere un material relativamente resistente, rígido y duro para evitar el desgaste, por lo que un polímero termoestable podría resultar el más apropiado.

15-2 Polimerización por adición

La **polimerización por adición** y **por condensación** son las dos principales maneras de efectuar la "polimerización" (creación de un polímero). Los polímeros resultado de estos procesos se conocen como polímeros por adición y condensación, respectivamente. La formación del polímero más común, el polietileno (PE, de *polyethylene*), a partir de moléculas de etileno, es un ejemplo de polimerización por adición, es decir, por crecimiento de cadenas. El etileno, que es un gas, es el monómero (unidad individual) y tiene como fórmula C_2H_4 . Los dos átomos de carbono están unidos por un enlace covalente doble. Cada átomo de carbono comparte dos de sus electrones con el otro átomo de carbono, y dos átomos de hidrógeno están unidos o enlazados con cada uno de los átomos de carbono (Fig. 15-4).

En presencia de una combinación apropiada de calor, presión y catalizadores, se rompe el enlace doble entre los átomos de carbono, y es reemplazado por un enlace covalente simple. Los extremos del monómero son ahora *radicales libres*; cada átomo de carbono tiene un electrón sin pareja que puede compartir con otros radicales libres. La polimerización por adición ocurre debido a que el monómero original contiene un enlace covalente doble entre los átomos de carbono. El enlace doble es un **enlace no saturado**. Después de su transformación a un enlace simple, los átomos de carbono todavía están unidos, pero se convierten en activos; se pueden agregar otras *unidades de repetición* o meros para producir la cadena polimérica. En el etileno existen dos sitios (cada átomo de carbono) donde se pueden conectar moléculas. Por tanto, el etileno es **bifuncional**, y solamente se forman cadenas. La **funcionalidad** es el número de sitios en los cuales se pueden fijar nuevas moléculas a la unidad de repetición del polímero. Si existen tres o más sitios en los cuales se pueden fijar las moléculas, se formará una red tridimensional.

Para que inicie el proceso de polimerización por adición, se agrega un iniciador al monómero (Fig. 15-5). El iniciador, que actúa como "interruptor de arranque", forma radicales libres con el sitio que atrae uno de los átomos de carbono de un monómero de etileno. Al ocurrir

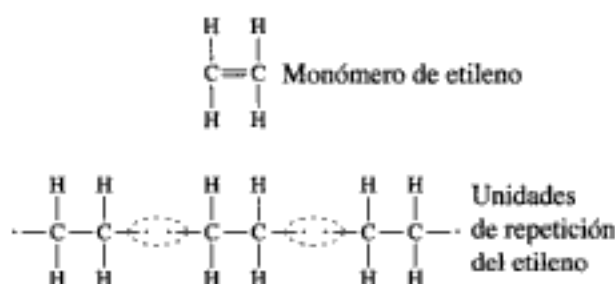


Figura 15-4

Reacción de adición para producir polietileno a partir de moléculas de etileno. El enlace doble no saturado del monómero se deshace para producir sitios activos, los cuales atraen posteriormente unidades de repetición adicionales a cualquiera de sus extremidades para producir una cadena.

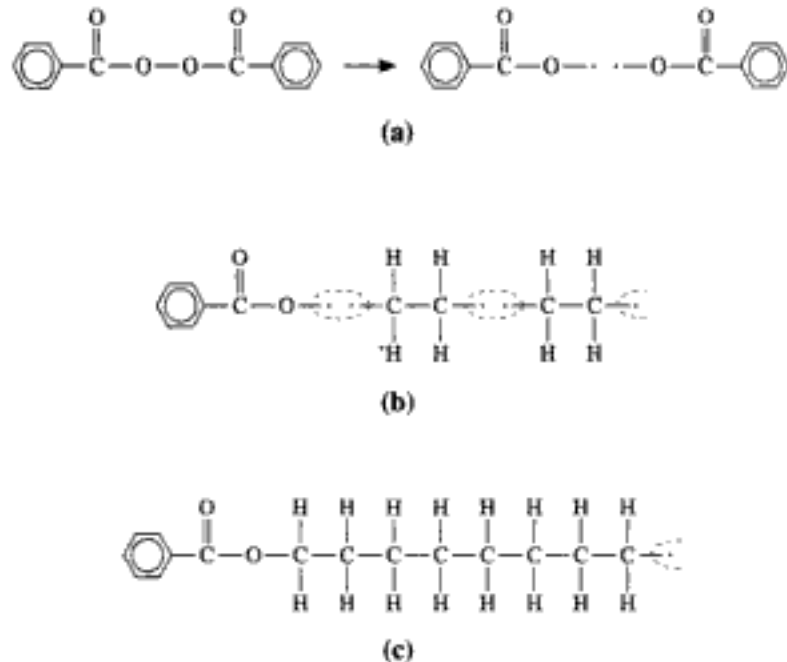


Figura 15-5 Iniciación de una cadena de polietileno por crecimiento de la misma y que puede incluir (a) la producción de radicales libres a partir de iniciadores como el peróxido de benzoilo, (b) por fijación de una unidad de repetición de polietileno a uno de los radicales iniciadores y (c) fijación de unidades de repetición adicionales para la propagación de la cadena.

esta reacción, el sitio reactivo se transfiere a otro átomo de carbono del monómero y empieza a formarse una cadena. En este nuevo sitio se puede fijar una segunda unidad de repetición de etileno, alargándose así la cadena. Este proceso sigue igual hasta que se haya formado una larga cadena de polietileno, es decir, un polímero por adición. Dado que los iniciadores, que a menudo son peróxidos, reaccionan entre sí como lo hacen con el monómero, sus vidas útiles son relativamente cortas. Un iniciador común es el peróxido de benzoilo (Fig. 15-5). Una vez iniciada la cadena, se van agregando unidades de repetición en cada una de las cadenas a alta velocidad, quizá varios miles de adiciones por segundo. Cuando la polimerización está casi terminada, los pocos monómeros restantes se deben difundir largas distancias antes de alcanzar un sitio activo al final de la cadena; en consecuencia, la velocidad de crecimiento se reduce.

Terminación de la polimerización por adición Necesitamos polímeros que exhiban un peso molecular promedio y una distribución de peso molecular controlados. Por tanto, las reacciones de polimerización deberán tener algún interruptor para “apagarla”. Las cadenas pueden terminarse mediante dos mecanismos (Fig. 15-6). Primero, las extremidades de dos cadenas pueden unirse. Este proceso, que se conoce como *combinación*, crea una sola cadena larga a partir de dos más cortas. Segundo, el extremo activo de una de las cadenas puede quitar un átomo de hidrógeno de una segunda cadena utilizando un proceso conocido como *desproporción*. Esta reacción termina dos cadenas, en vez de combinarlas en una más grande. A veces, se agregan compuestos químicos conocidos como terminadores, para terminar las reacciones de polimerización. En general, en los materiales termoplásticos, cuanto mayor sea el peso molecular promedio, más elevada será la temperatura de fusión y mayor el módulo de Young del polímero (sección 15-4). El siguiente ejemplo ilustra una reacción de polimerización por adición.

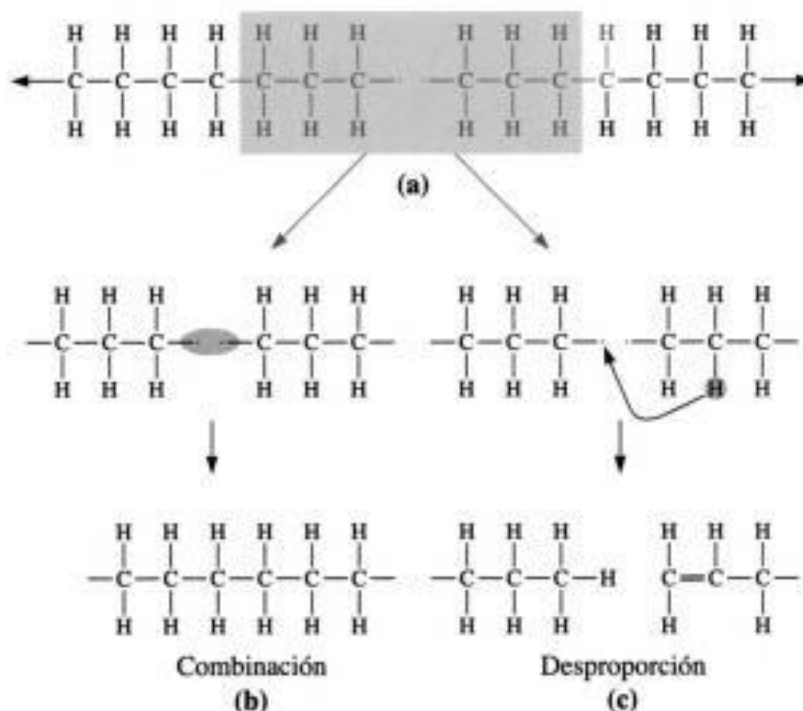


Figura 15-6 Terminación del crecimiento de cadenas de polietileno: (a) los extremos activos de dos cadenas se acercan entre sí, (b) las dos cadenas sufren una combinación y forman una cadena larga y (c) el reordenamiento de un átomo de hidrógeno y la creación de un enlace covalente doble por desproporción causa la terminación de dos cadenas.

EJEMPLO 15-2 Cálculo de iniciador requerido

Calcule la cantidad de peróxido de benzoílo que se requiere como catalizador para producir 1 kg de polietileno con un peso molecular promedio de 200 000 g/mol. ¿Cuál es el grado de polimerización? Suponga que sólo el 20% del iniciador es realmente eficaz y que todas las terminaciones ocurren mediante el mecanismo de combinación.

SOLUCIÓN

Para una eficiencia de 100%, necesitamos una molécula de peróxido de benzoílo por cada cadena de polietileno. Uno de los radicales libres iniciaría una cadena, el segundo radical libre iniciaría una segunda; entonces, las dos cadenas se combinan en una más larga. El peso molecular del etileno = $(2C)(12) + (4H)(1) = 28$ g/mol. Por tanto, el grado de polimerización es:

$$\frac{200\,000 \text{ g/mol}}{28 \text{ g/mol}} = 7143 \text{ moléculas de etileno por cadena promedio}$$

$$\frac{(1000 \text{ g de polietileno})(6.02 \times 10^{23} \text{ monómeros/mol})}{28 \text{ g/mol}} = 215 \times 10^{23} \text{ monómeros}$$

El mecanismo de combinación requiere que el número de moléculas de peróxido de benzoílo sea:

donde M_i es otra vez el peso molecular medio de cada rango, pero x_i es la fracción del número total de cadenas dentro de cada rango. Se puede utilizar de manera indistinta $\bar{M}_x$ o $\bar{M}_n$ para calcular el grado de polimerización.

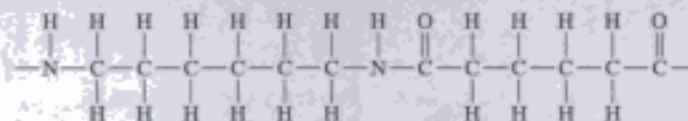
Los dos ejemplos siguientes ilustran estos conceptos.

EJEMPLO 15-4 Grado de polimerización para el nylon 6,6

Calcule el grado de polimerización si el nylon 6,6 tiene un peso molecular de 120 000 g/mol.

SOLUCIÓN

La reacción mediante la cual se produce el nylon 6,6 la describimos en el ejemplo 15-3. La hexametilendiamina se combina con el ácido adípico y libera una molécula de agua. Cuando se forma una cadena larga, existe, en promedio, una molécula de agua liberada por cada molécula en reacción. Los pesos moleculares son 116 g/mol para la hexametilendiamina, 146 g/mol para el ácido adípico y 18 g/mol para el agua. La unidad de repetición para el nylon 6,6 es:



El peso molecular de la unidad de repetición es la suma de los pesos moleculares de los dos monómeros, menos el correspondiente a las dos moléculas de agua resultantes:

$$M_{\text{unidad de repetición}} = 116 + 146 - 2(18) = 226 \text{ g/mol}$$

$$\text{Grado de polimerización} = \frac{120\,000}{226} = 531$$

El grado de polimerización se refiere al número total de unidades de repetición existentes en la cadena. La cadena contiene 531 moléculas de hexametilendiamina y 531 moléculas de ácido adípico.

EJEMPLO 15-5 Pesos moleculares promedio por peso y por número

Tenemos una muestra de polietileno que contiene 4000 cadenas con pesos moleculares entre 0 y 5000 g/mol, 8000 cadenas con pesos moleculares entre 5000 y 10 000 g/mol, 7000 cadenas con pesos moleculares entre 10 000 y 15 000 g/mol y 2000 cadenas con pesos moleculares entre 15 000 y 20 000 g/mol. Determine el peso molecular promedio tanto por número como por peso.

SOLUCIÓN

Primero es necesario determinar la fracción numérica x_i y la fracción por peso f_i para cada uno de los cuatro rangos. En el caso de x_i , simplemente dividimos el número en cada rango entre 21 000, que es el número total de cadenas. Para determinar f_i , primero multiplicamos el número de cadenas por el peso molecular promedio de las mismas en cada rango, con lo que obtenemos el "peso" de cada grupo, y después encontramos f_i dividiendo entre el peso total de 192.5×10^6 . Podremos entonces utilizar las ecuaciones 15-2 y 15-3 para determinar los pesos moleculares.

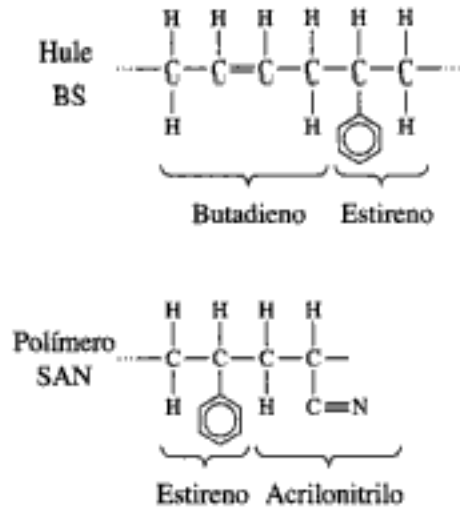


Figura 15-11
La copolimerización produce el polímero ABS, que realmente está formado de dos copolímeros, el SAN y el BS, injertos el uno en el otro.

un copolímero lineal, el hule BS, que actúa como material de relleno. La combinación de los dos copolímeros da al ABS una excelente combinación de rigidez, resistencia y tenacidad. Otro copolímero común contiene unidades de repetición de etileno y de propileno. Aunque el polietileno y el polipropileno son ambos fácilmente cristalizables, el copolímero se conserva amorfo. Cuando este polímero se entrelaza, se generan enlaces cruzados, se comporta como un elastómero. Dylark™ es un copolímero de anhídrido maleico y de estireno. El estireno aporta la tenacidad, en tanto que el anhídrido maleico aporta propiedades a altas temperaturas. Al copolímero Dylark™ se le agrega negro de carbono (para protegerlo de los rayos ultravioleta y mejorar la rigidez), hule (para obtener tenacidad) y fibras de vidrio (para obtener rigidez). Se utiliza para los tableros de instrumentos en los automóviles. Después, el plástico Dylark™ se recubre con vinilo, que le da un terminado liso y suave.

Mezclas y aleaciones Podemos mejorar las propiedades mecánicas de muchos de los termoplásticos mediante la mezcla y la aleación. Al mezclar un elastómero no miscible con el termoplástico, producimos un polímero de dos fases, como vimos en el ABS. El elastómero no se introduce en la estructura como copolímero, sino que ayuda a absorber energía y mejorar la tenacidad. También los policarbonatos que se utilizan para producir carlingas transparentes para aeronaves se endurecen con elastómeros de esta manera.

Polímeros cristalinos líquidos Algunas de las cadenas termoplásticas complejas se hacen tan rígidas que se comportan como varillas rígidas, incluso cuando se calientan por encima del punto de fusión. Estos materiales son los **polímeros cristalinos líquidos** (LCP, por sus siglas en inglés).[2] Algunos poliésteres aromáticos y poliamidas aromáticas (o **aramidas**) son ejemplos de polímeros cristalinos líquidos y se utilizan como fibras de alta resistencia (según se verá en el capítulo 16). El Kevlar™, una poliamida aromática, es el LCP más familiar y se utiliza como fibra de refuerzo para aplicaciones aeroespaciales y para chalecos a prueba de balas. Los polímeros de cristal líquidos (LC, por sus siglas en inglés) se utilizan, naturalmente, para la fabricación de pantallas o despliegues electrónicos.

15-7 Efecto de la temperatura sobre los termoplásticos

Las propiedades de los termoplásticos cambian en función de la temperatura. Es necesario saber la forma en que ocurren estos cambios, ya que pueden ayudarnos a a) diseñar mejores componentes y b) guiar el tipo de técnicas de procesamiento que deban utilizarse. Se pueden observar varias temperaturas y estructuras críticas, las cuales se resumen en las figuras 15-12 y 15-13.



Figura 15-12 Efecto de la temperatura en la estructura y en el comportamiento de los materiales termoplásticos.

Una vez que se hayan enfriado por debajo de la temperatura de fusión, los materiales termoplásticos pueden ser amorfos o cristalinos (Fig. 15-12). Con mayor frecuencia, los termoplásticos de ingeniería están formados por regiones amorfas y cristalinas. La cristalinidad en los materiales termoplásticos puede introducirse por temperatura (enfriamiento lento) o mediante la aplicación de esfuerzos que desenmarañen cadenas (cristalización inducida por esfuerzo, capítulo 6). De manera similar al endurecimiento por dispersión de los materiales metálicos, la formación de regiones cristalinas en una matriz que, por lo demás, es amorfa ayuda a incrementar la resistencia de los termoplásticos. En los materiales termoplásticos comunes, las uniones dentro de las cadenas es covalente, pero las largas cadenas en espiral están "unidas" entre sí por débiles enlaces van der Waals y enmarañamiento. Cuando al termoplástico se le aplica un esfuerzo a la tensión, se puede superar la débil unión entre las cadenas, permitiendo que éstas giren y se deslicen una en relación con la otra. La facilidad con que dichas cadenas puedan deslizarse depende a la vez de la temperatura y de la estructura del polímero.

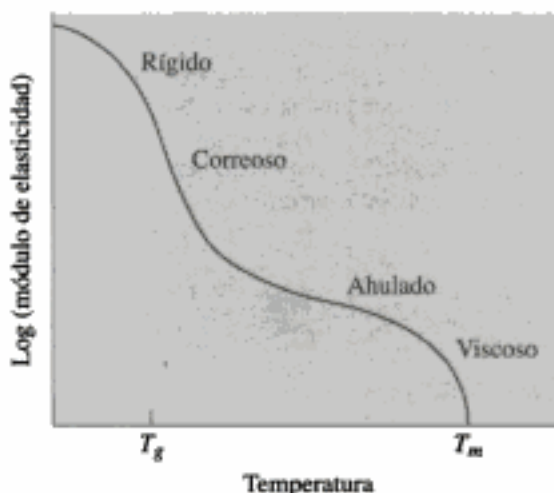


Figura 15-13 Efecto de la temperatura sobre el módulo de elasticidad en un polímero termoplástico amorfo. Nótese que T_g y T_m no están fijos.

Temperatura de degradación A temperaturas muy altas pueden destruirse los enlaces covalentes entre los átomos dentro de la cadena lineal y el polímero puede quemarse o carbonizarse. En los polímeros termoplásticos, la descomposición se presenta en el estado líquido; en los termoestables, en el estado sólido. Esta temperatura T_d (que no aparece en la figura 15-13) es la **temperatura de degradación** o de descomposición. Cuando los plásticos se queman, generan humo, lo cual es peligroso. Algunos materiales agregados a los termoplásticos —como, por ejemplo, la piedra caliza, el talco, la alúmina, etc.— actúan como estabilizadores térmicos, es decir, del calor. Absorben el calor protegiendo la matriz polimérica. A fin de retardar la ignición de los polímeros, se agregan aditivos retardantes del fuego, como por ejemplo, alúmina hidratada, materiales compuestos de antimonio o de halógenos (por ejemplo, $MgBr$, PCl_3). Algunos aditivos son retardantes del fuego al excluir el oxígeno pero generan gases dañinos y no son apropiados para ciertas aplicaciones.

La exposición a otras formas de productos químicos o de energías —por ejemplo, oxígeno, radiación ultravioleta y ataques por bacterias— también hace que el polímero se degrade o se **envejezca** lentamente, incluso a bajas temperaturas. El negro de carbono (hasta ~3%) es uno de los aditivos comúnmente utilizados que ayudan a mejorar la resistencia de los plásticos contra la degradación por rayos ultravioleta.

Polímeros líquidos Los materiales termoplásticos, por lo común, no se funden a una temperatura precisa. En vez de ello, existe, por lo general, un rango de temperaturas en el cual ocurre la fusión. Los rangos de fusión aproximados de los polímeros comunes aparecen en la tabla 15-5. A o por encima de la temperatura de fusión T_m , la unión entre las cadenas en espiral y entrelazadas es débil. Si se aplica una fuerza, las cadenas se deslizan una sobre otra y el polímero fluye sin virtualmente ninguna deformación elástica. La resistencia y el módulo de elasticidad

TABLA 15-5 ■ Rangos de temperatura de fusión y de transición vítrea ($^{\circ}C$) para polímeros termoplásticos y elastómeros seleccionados

Polímeros	Temperatura de fusión	Temperatura de transición vítrea (T_g)	Temperatura de procesamiento
Polímeros por adición			
Poliétileno de baja densidad (LD)	98–115	–90 a –25	149–232
Poliétileno de alta densidad (HD)	130–137	–110	177–280
Cloruro de polivinilo	175–212	87	
Polipropileno	160–180	–25 a –20	190–288
Poliestireno	240	85–125	
Poliacrilonitrilo	320	107	
Politetrafluoroetileno (teflón)	327		
Policlorotrifluoroetileno	220		
Polimetilmetacrilato (acrílico)		90–105	
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	110–125	100	177–260
Polímeros por condensación			
Acetal	181	–85	
Nylon 6,6	243–260	49	260–327
Acetato de celulosa	230		
Policarbonato	230	149	271–300
Poliéster	255	75	
Poliétileno tereftalato (PET)	212–265	66–80	227–349
Elastómeros			
Silicona		–123	
Polibutadieno	120	–90	
Policloropreno	80	–50	
Poliisopreno	30	–73	

Observación y medición de la cristalinidad en los polímeros Muchos polímeros termoplásticos se cristalizan parcialmente al ser enfriados por debajo de su temperatura de fusión, y las cadenas se acercan y se alinean estrechamente a lo largo de distancias apreciables. Conforme las cadenas en espiral y entrelazadas se reorganizan dentro del líquido formando una estructura más ordenada y compacta, se presenta un brusco incremento en la densidad (Fig. 15-14).

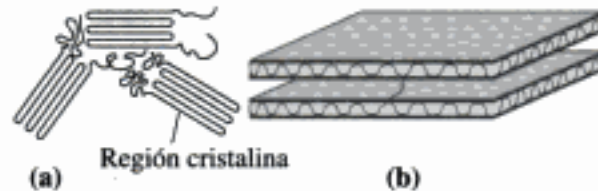


Figura 15-15
Modelo de cadenas plegadas para la cristalinidad en los polímeros, mostrado en (a) dos dimensiones y (b) tres dimensiones.

En la figura 15-15 se muestra un modelo que describe el arreglo de las cadenas en un polímero cristalino. En este modelo de *cadenas plegadas*, éstas se doblan sobre sí mismas, donde cada doblez tiene una longitud de aproximadamente 100 átomos de carbono. La cadena plegada se extiende en las tres dimensiones, produciendo placas delgadas, es decir laminillas. Los cristales pueden asumir varias formas, siendo particularmente común la forma esferulítica que se muestra en la figura 15-16. Los cristales tienen una celda unitaria que describe el empaquetamiento normal de las cadenas. La estructura cristalina para el polietileno, mostrada en la figura 3-41, describe una de estas celdas. En la tabla 15-6 se describen las estructuras cristalinas para varios polímeros. Algunos polímeros son polimórficos, es decir, tienen más de una estructura cristalina.

Incluso en los polímeros cristalinos, siempre existen regiones angostas entre las laminillas, así como entre las esferulitas, que son regiones de transición amorfa. El porcentaje en peso de la estructura que es cristalina puede calcularse partiendo de la densidad del polímero

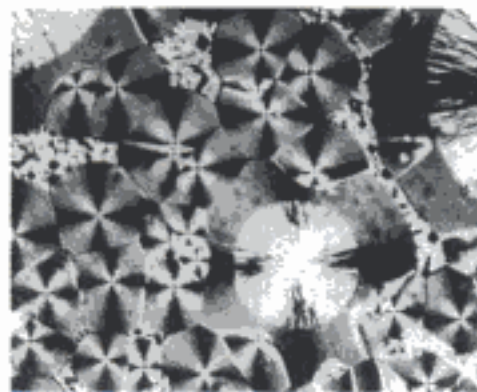


Figura 15-16
Fotografía de cristales esferulíticos en una matriz amorfa de nylon (200 x). (De R. Brick, A. Pense y R. Gordon, *Structure and Properties of Engineering Materials*, 4a. ed., McGraw-Hill, 1977.)

TABLA 15-6 ■ Estructuras cristalinas de varios polímeros

Polímero	Estructura cristalina	Parámetros de la red (nm)
Polietileno	Ortorrómbica	$a_0 = 0.742$ $b_0 = 0.495$ $c_0 = 0.255$
Polipropileno	Ortorrómbica	$a_0 = 1.450$ $b_0 = 0.569$ $c_0 = 0.740$
Cloruro de polivinilo	Ortorrómbica	$a_0 = 1.040$ $b_0 = 0.530$ $c_0 = 0.510$
Poliisopreno (cis)	Ortorrómbica	$a_0 = 1.246$ $b_0 = 0.886$ $c_0 = 0.810$

$$\% \text{ de cristalinidad} = \frac{\rho_c (\rho - \rho_a)}{\rho (\rho_c - \rho_a)} \times 100, \quad (15-4)$$

donde ρ es la densidad medida del polímero; ρ_a , la densidad del polímero amorfo, y ρ_c , la densidad del polímero completamente cristalino. De igual manera, puede utilizarse la difracción de los rayos X (DRX) para medir el nivel de cristalinidad y para la determinación de las constantes de la estructura cristalina para polímeros monocristalinos.[9] (Véase el capítulo 3).

Conforme los grupos laterales se hacen más complejos, resulta más difícil cristalizar los termoplásticos. Por ejemplo, el polietileno —grupo lateral H— puede cristalizarse con mayor facilidad que el poliestireno —grupo lateral anillo de benceno—. El polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés) tiene un nivel superior de cristalinidad y, por tanto, una densidad más elevada (0.97 g/cc). El polietileno de baja densidad (LDPE, por sus siglas en inglés) tiene una densidad de 0.92 g/cc. La cristalinidad y, en consecuencia, la densidad del LDPE es inferior, en vista de que este polímero es ramificado. Por tanto, los polímeros ramificados exhiben niveles menores de cristalinidad. Un polímero totalmente cristalino no tendría una temperatura de transición vítrea; sin embargo, las regiones amorfas en los polímeros semicristalinos sí se convierten en un material vítreo por debajo de la temperatura de transición vítrea (Fig. 15-14). Los polímeros como el acetal, el nylon, HDPE y el polipropileno se conocen como cristalinos, aun cuando su nivel de cristalinidad pudiera ser moderado.[1] Los siguientes ejemplos muestran la forma en que las propiedades de los plásticos se pueden reconocer en diferentes aplicaciones.

EJEMPLO 15-6 *Diseño de un material polimérico aislante*

Un depósito de almacenamiento para hidrógeno líquido se fabricará de metal, pero deseamos revestir dicho metal con una capa intermedia de polímero de 3 mm de espesor entre el metal y las capas de aislamiento adicionales. La temperatura de la capa intermedia puede bajar hasta -80°C . Diseñe un material para esta capa.

SOLUCIÓN

Deseamos que el material tenga una ductilidad razonable. Conforme cambia la temperatura en el depósito, se desarrollan esfuerzos en el revestimiento a causa de las diferencias en la dilatación térmica, y no queremos que falle el polímero por esta razón. Se necesita un material que tenga buena ductilidad y/o que pueda soportar grandes deformaciones elásticas. Preferiremos, por tanto, un material termoplástico con una temperatura de transición vítrea inferior a -80°C o un elastómero, también con una temperatura de transición por debajo a los -80°C . Del listado de polímeros de la tabla 15-2, se llega a la conclusión de que los termoplásticos como el acetal y el polietileno son satisfactorios. Entre los elastómeros apropiados, podemos incluir la silicona y el polibutadieno.

Podríamos elegir quizás uno de los elastómeros, ya que éstos pueden “absorber” esfuerzos térmicos mediante deformación elástica en vez de plástica.

EJEMPLO 15-7 *Polietileno resistente al impacto*

Un nuevo tipo de polietileno flexible y resistente al impacto, para usarse como una película delgada, debe tener una densidad de entre 0.88 y 0.915 g/cm³. Diseñe el polietileno necesario para estas propiedades. La densidad del polietileno amorfo es de aproximadamente 0.87 g/cm³.

SOLUCIÓN

Para producir las propiedades y densidades deseadas, debemos controlar el porcentaje de cristalinidad del polietileno. Podemos utilizar la ecuación 15-4 para determinar la cristalinidad que corresponde al rango requerido de densidad; sin embargo, para ello debemos conocer la densidad del polietileno totalmente cristalino. Podemos utilizar los datos de la tabla 15-3 para calcular esta densidad, si aceptamos que existen dos unidades de repetición de polietileno en cada celda unitaria (véase el ejemplo 3-16):

$$\rho_c = \frac{(4 \text{ C})(12) + (8 \text{ H})(1)}{(7.42)(4.95)(2.55)(10^{-24})(6.02 \times 10^{23})} = 0.9932 \text{ g/cm}^3$$

Sabemos que $\rho_a = 0.87 \text{ g/cm}^3$ y que ρ varía de 0.88 a 0.915 g/cm^3 . La cristalinidad necesaria varía entonces desde:

$$\% \text{ de cristalinidad} = \frac{(0.9932)(0.88 - 0.87)}{(0.88)(0.9932 - 0.87)} \times 100 = 9.2$$

$$\% \text{ de cristalinidad} = \frac{(0.9932)(0.915 - 0.87)}{(0.915)(0.9932 - 0.87)} \times 100 = 39.6$$

Por tanto, debemos poder procesar el polietileno para producir un rango de cristalinidad de entre 9.2 y 39.6%.

15-8**Propiedades mecánicas de los termoplásticos**

La mayoría de los polímeros **termoplásticos** (fundidos y sólidos) exhiben un comportamiento **no newtoniano y viscoelástico** (capítulo 6). El comportamiento es no newtoniano; es decir, el esfuerzo y la deformación **no están relacionadas linealmente** para la mayor parte de la curva esfuerzo-deformación. El comportamiento viscoelástico significa que cuando a un polímero termoplástico se le aplica una fuerza externa, ocurren deformaciones tanto elásticas como plásticas (viscosas). El comportamiento mecánico está íntimamente ligado a la forma en que las cadenas poliméricas se mueven bajo carga en relación con las demás. En los termoplásticos la deformación es más complicada. El proceso de deformación depende a la vez del tiempo y de la velocidad a la cual se aplica la carga. La figura 15-17 muestra una curva esfuerzo-deformación para el nylon 6,6.

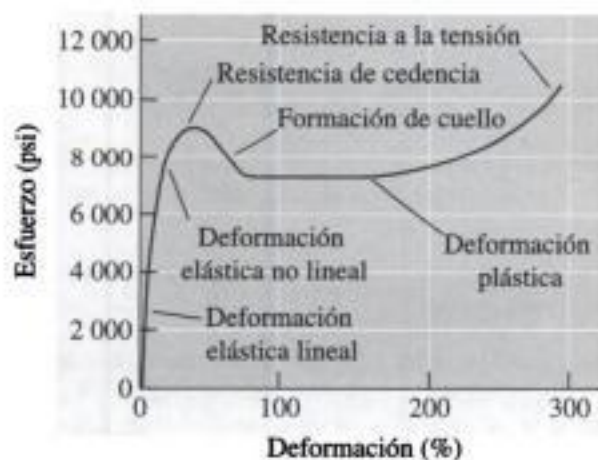


Figura 15-17
Curva esfuerzo-deformación del nylon 6,6, un polímero termoplástico común.

Comportamiento elástico La deformación elástica en estos polímeros termoplásticos es el resultado de dos mecanismos. Un esfuerzo aplicado hace que los enlaces covalentes de las cadenas se estiren y se distorsionen, permitiendo el alargamiento elástico de las mismas. Cuando se elimina el esfuerzo, la recuperación de esta distorsión ocurre casi instantáneamente. Este comportamiento es similar al de los metales y de los materiales cerámicos, que también se deforman elásticamente al estirar los enlaces metálicos, iónicos o covalentes. Pero, además, se pueden distorsionar segmentos completos en la cadena polimérica; cuando se elimina el esfuerzo, los segmentos vuelven a sus posiciones originales sólo después de cierto tiempo, a veces horas o incluso meses. Este comportamiento dependiente del tiempo, o viscoelástico, puede contribuir a algún comportamiento elástico no lineal.

Comportamiento plástico de los termoplásticos amorfos Estos polímeros se deforman plásticamente cuando el esfuerzo es superior a la resistencia de cedencia. Sin embargo, a diferencia de la deformación en el caso de los metales, la deformación plástica no es una consecuencia del movimiento de dislocaciones. En vez de lo anterior, las cadenas se estiran, giran, se deslizan y se desenmarañan bajo la acción de la carga para causar una deformación permanente. Este fenómeno puede explicar la caída en el esfuerzo más allá del punto de cedencia. Inicialmente, las cadenas pueden estar muy enmarañadas y entrelazadas. Cuando el esfuerzo es suficientemente elevado, las cadenas empiezan a desenmarañarse y enderezarse. También la formación de cuello tiene lugar, lo que permite el continuo deslizamiento de las cadenas con un esfuerzo menor. Sin embargo, las cadenas finalmente se arreglan de una forma casi paralela y muy cerca unas de otras; el enlace van der Waals más fuerte entre las cadenas alineadas más estrechamente requiere de esfuerzos superiores para completar el proceso de deformación y de fractura (Fig. 15-18). Este tipo de cristalización causado por la orientación representó un papel importante en el descubrimiento del nylon como material útil para la fabricación de fibras resistentes.

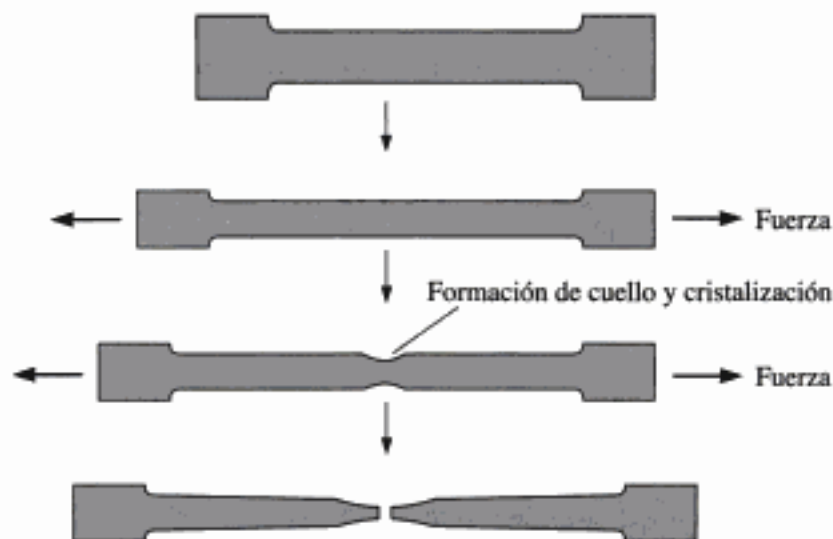


Figura 15-18 En los polímeros amorfos la formación de cuello no es estable, debido a que la alineación local endurece la región de sección reducida, reduciendo su velocidad de deformación.

EJEMPLO 15-8 Comparación de las propiedades mecánicas de los polímeros termoplásticos

Compare las propiedades mecánicas del polietileno de baja densidad (LD), del polietileno de alta densidad (HD), del cloruro de polivinilo, del polipropileno y del poliestireno y explique las diferencias en función de sus estructuras.

SOLUCIÓN

Veamos la resistencia máxima a la tensión y el módulo de elasticidad de cada uno de los polímeros.

Polímero	Resistencia a la tensión (psi)	Módulo de elasticidad (ksi)	Estructura
Polietileno LD	3000	40	Estructura amorfa muy ramificada con monómeros simétricos
Polietileno HD	5500	180	Estructura amorfa con monómeros simétricos pero con pocas ramificaciones
Polipropileno	6000	220	Estructura amorfa con pequeños grupos laterales de metilo
Poliestireno	8000	450	Estructura amorfa con grupos laterales de benceno
Cloruro de polivinilo	9000	600	Estructura amorfa con grandes átomos de cloro en los grupos laterales

Podemos concluir lo siguiente:

1. Las ramificaciones, que disminuyen la densidad y el empaquetamiento estrecho de las cadenas, reducen las propiedades mecánicas del polietileno.
2. Al añadir átomos o grupos de átomos distintos al hidrógeno a la cadena se incrementan la resistencia y la rigidez. El grupo metilo en el polipropileno causa una cierta mejora, el anillo de benceno del estireno da mejores propiedades y el átomo de cloro en el cloruro de polivinilo proporciona un incremento importante en las propiedades.

Termofluencia y relajación de esfuerzos Los polímeros termoplásticos también exhiben termofluencia, una deformación permanente que depende del tiempo ante un esfuerzo o carga constante (Figs. 15-19 y 15-20).

También muestran relajación de esfuerzos; es decir, bajo una deformación constante, el nivel de esfuerzo se reduce con el tiempo (capítulo 6). La relajación de esfuerzo, igual que la termofluencia, es una consecuencia del comportamiento viscoelástico del polímero. Quizás el ejemplo más familiar de este comportamiento es una banda elástica (un elastómero) estirada alrededor de varios libros. Inicialmente, la tensión en la banda es elevada, cuando la banda elástica está tensa. Después de varias semanas, la deformación en la banda elástica no ha cambiado, sigue estando alrededor de los libros, pero el esfuerzo habrá disminuido; es decir, la banda ya no está tensa. De igual manera, las cuerdas de nylon en las raquetas de tenis se estiran inicialmente con una tensión más elevada, ya que ésta última —es decir, el esfuerzo— disminuirá con el transcurso del tiempo.

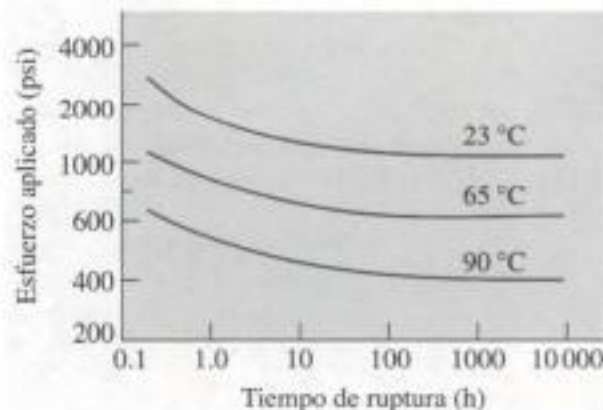


Figura 15-19 Efecto de la temperatura sobre el comportamiento esfuerzo-ruptura del polietileno de alta densidad.

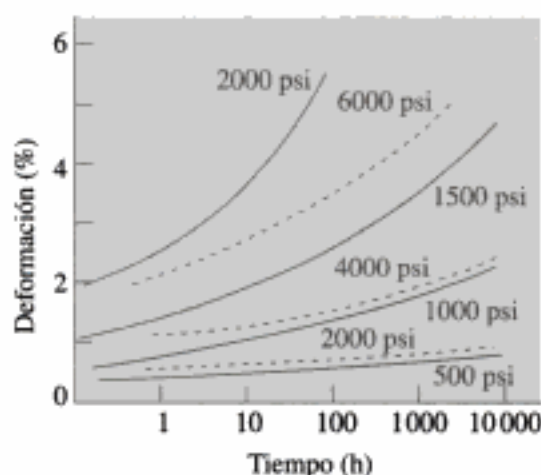


Figura 15-20
Curvas de termofluencia para el acrílico (PMMA) (líneas punteadas) y polipropileno (líneas negras) a 20 °C y con varios esfuerzos aplicados.

En un modelo simple, la velocidad a la cual ocurre la relajación de esfuerzo está relacionada con el **tiempo de relajación** λ , que se considera una propiedad del polímero (modelos más complejos utilizan una distribución de los tiempos de relajación). El esfuerzo después del tiempo t está dado por

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-t/\lambda) \quad (15-5)$$

donde σ_0 es el esfuerzo original. El *tiempo de relajación*, a su vez, depende de la viscosidad y, por tanto, de la temperatura:

$$\lambda = \lambda_0 \exp(Q/RT) \quad (15-6)$$

donde λ_0 es una constante y Q es la energía de activación relacionada con la facilidad con la cual las cadenas poliméricas se deslizan entre sí. La relajación del esfuerzo ocurre con mayor rapidez a temperaturas más elevadas y para aquellos polímeros de baja viscosidad.

El siguiente ejemplo muestra cómo se puede tomar en cuenta la relajación del esfuerzo durante el diseño de polímeros.

EJEMPLO 15-9 *Diseño del esfuerzo inicial en un polímero*

Una banda de poliisopreno debe mantener unido un paquete de varillas de acero durante un año. Si el esfuerzo en la banda es inferior a 1500 psi, ésta no sujetará firmemente a las varillas. Diseñe el esfuerzo inicial que debe aplicarse a una banda de poliisopreno cuando es colocada sobre el acero. Una serie de pruebas mostró que un esfuerzo inicial de 1000 psi se redujo a 980 psi después de seis semanas.

SOLUCIÓN

Aunque la deformación en la banda del elastómero puede ser constante, el esfuerzo disminuirá con el transcurso del tiempo debido a la relajación del esfuerzo. Podemos utilizar la ecuación 15-5 y nuestras pruebas iniciales para determinar el tiempo de relajación para el polímero.

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right)$$

$$980 = 1000 \exp\left(-\frac{6}{\lambda}\right)$$

$$-\frac{6}{\lambda} = \ln\left(\frac{980}{1000}\right) = \ln(0.98) = -0.0202$$

$$\lambda = \frac{6}{0.0202} = 297 \text{ semanas}$$

Ahora que sabemos cuál es el tiempo de relajación, podemos determinar el esfuerzo que debe aplicarse inicialmente a la banda a fin de que quede bajo un esfuerzo de 1500 psi después de un año (52 semanas).

$$1500 = \sigma_0 \exp(-52/297) = \sigma_0 \exp(-0.175) = 0.839\sigma_0$$

$$\sigma_0 = \frac{1500}{0.839} = 1788 \text{ psi}$$

La banda de poliisopreno debe fabricarse significativamente subdimensionada, de manera que pueda deslizarse sobre los materiales que se van a unir con una tensión de 1788 psi. Después de un año, el esfuerzo seguirá siendo de 1500 psi.

Una medida más práctica de las propiedades de alta temperatura y de termofluencia de un polímero es la **temperatura de deflexión térmica** o **temperatura de distorsión térmica** bajo carga, que es la temperatura a la cual ocurre una deformación dada en una viga para una carga estándar. Una temperatura de deflexión elevada indica una buena resistencia a la termofluencia y nos permite comparar varios polímeros. En la tabla 15-7 se muestran las temperaturas de deflexión para varios polímeros, que nos da la temperatura requerida para causar una deflexión de 0.01 pulg bajo un esfuerzo de 264 psi en el centro de una barra que descansa sobre puntos de apoyo separados cuatro pulgadas. Un polímero es "a prueba de lavavajillas" si tiene una temperatura de distorsión térmica superior a ~50 °C.

TABLA 15-7 ■ Temperaturas de deflexión para polímeros seleccionados bajo un esfuerzo de 264 psi

Polímero	Temperatura de deflexión (°C)
Poliéster	40
Poliétileno (densidad ultraalta)	40
Polipropileno	60
Fenólica	80
Poliamida (nylon 6,6)	90
Poliestireno	100
Polioximetileno (acetal)	130
Poliamidaimida	280
Epoxi	290

Comportamiento al impacto El comportamiento viscoelástico también nos ayuda a comprender las propiedades al impacto de los polímeros. A velocidades de deformación muy altas, como ocurre en una prueba de impacto, no hay tiempo suficiente para que las cadenas se deslicen causando deformación plástica. En estas circunstancias, los termoplásticos se comportan de manera frágil y tienen valores al impacto bajos. Como se analizó aquí y en el capítulo 6, los polímeros pueden tener una temperatura de transición. A bajas temperaturas, se observa un comportamiento frágil en una prueba de impacto mientras que a temperaturas elevadas se muestra un comportamiento más dúctil, cuando las cadenas se mueven con mayor facilidad. Estos efectos sobre la temperatura y la velocidad de deformación son similares a los que se observan en los metales que exhiben una temperatura de transición de dúctil a frágil; sin embargo, los mecanismos son distintos.

Deformación de los polímeros cristalinos Varios polímeros son utilizados en el estado cristalino. Sin embargo, como se analizó anteriormente, estos materiales nunca son totalmente cristalinos. Existen pequeñas regiones, que son regiones de transición amorfas, entre las laminillas cristalinas y entre las esferulitas cristalinas. Las cadenas poliméricas en la región cristalina se extienden hacia el interior de esas regiones amorfas como cadenas de unión. Cuando se aplica al polímero una carga a la tensión, las laminillas cristalinas dentro de las esferulitas se deslizan una por encima de la otra y empiezan a separarse conforme las cadenas de unión se estiran. Los dobleces entre laminillas se tuercen y se alinean con la dirección de la carga a la tensión. Las laminillas cristalinas se rompen en trozos más pequeños y se deslizan, hasta que finalmente el polímero queda compuesto de pequeños cristales alineados unidos por cadenas de unión y orientados paralelamente hacia la carga a la tensión. Las esferulitas además cambian de forma alargándose en la dirección del esfuerzo aplicado. Bajo un esfuerzo continuado, las cadenas de unión se desenmarañan o se rompen haciendo que el polímero falle.

Agrietamiento en polímeros En los termoplásticos se presentan microcavidades cuando las regiones localizadas de deformación plástica ocurren en dirección perpendicular a la del esfuerzo aplicado. En los termoplásticos transparentes, como en algunos de los polímeros vítreos, las microcavidades producen una región translúcida u opaca que parece una grieta. La microcavidad puede crecer hasta extenderse en toda la sección transversal de la pieza de polímero. Pero la microcavidad no es una grieta y, de hecho, puede seguir soportando un esfuerzo aplicado. El proceso es similar a la deformación plástica del polímero, pero puede avanzar incluso ante un esfuerzo reducido a lo largo de un periodo largo. Las microcavidades pueden provocar una fractura frágil del polímero, a veces auxiliada por la presencia de un solvente (microcavidad por solvente).[1].

Blanqueo El coloreado o blanqueado se refiere a la falla de un plástico por una cristalización localizada —causada, por ejemplo, por un doblado repetido— que finalmente genera la formación de huecos.

15-9

Elastómeros (hules)

Varios polímeros naturales y sintéticos conocidos como *elastómeros* despliegan gran cantidad de deformación (>200%) al aplicárseles una fuerza. Las bandas elásticas, los neumáticos de automóviles, los sellos "O", las mangueras y el aislamiento de los conductores eléctricos son usos comunes para este tipo de materiales.

Isómeros geométricos Algunos monómeros con estructuras diferentes, aunque con una misma composición, se llaman **isómeros geométricos**. Un ejemplo importante es el isopreno, es decir, el hule natural (Fig. 15-21). El monómero incluye dos enlaces dobles entre átomos de carbono; este tipo de monómero se conoce como un **dieno**. La polimerización ocurre cuando se rompen los dos enlaces dobles, creando en el centro de la molécula un nuevo enlace doble y dejando sitios activos en ambos extremos.

En la forma *trans* del isopreno, el átomo de hidrógeno y el grupo metilo en el centro de la unidad de repetición se encuentran en lados opuestos del doble enlace recién formado. Esta disposición lleva a cadenas relativamente rectas; el polímero se cristaliza y forma un polímero rígido y duro que se llama *gutapercha*. Éste se utiliza para manufacturar pelotas de golf y suelas para zapatos.

Sin embargo, en la forma *cis* el átomo de hidrógeno y el grupo metilo se encuentran del mismo lado del enlace doble. Esta diferente geometría hace que las cadenas del polímero se desarrollen en una estructura muy enrollada, dificultando una gran compactación y generando un polímero de hule amorfo. Si al *cis*-isopreno se le aplica un esfuerzo, el polímero se comporta

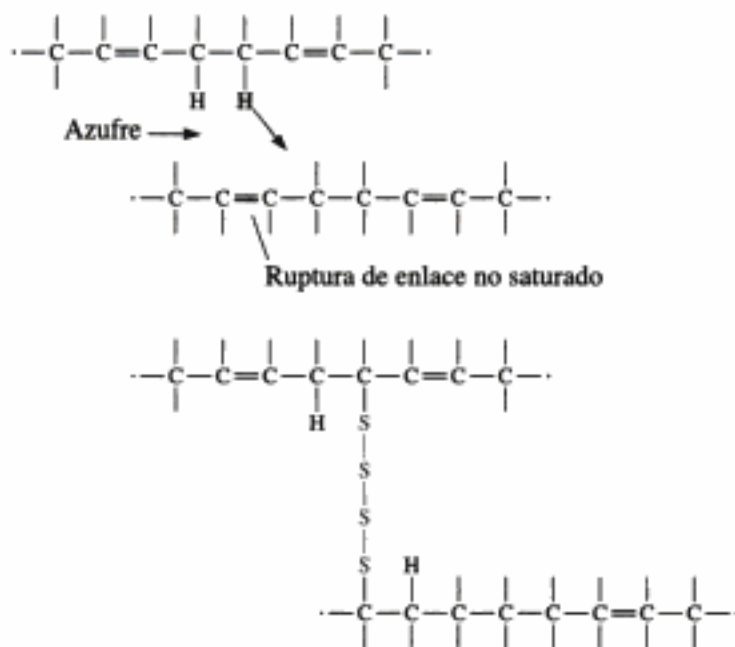


Figura 15-23
Enlaces cruzados de las cadenas de poliisopreno, que pueden presentarse al introducir hilos (cadenas cortas) de átomos de azufre. Los sitios de fijación del azufre se presentan al reacomodarse o al perderse un átomo de hidrógeno y por la ruptura de un enlace no saturado.

después de muchos años de intensos trabajos para obtener un hule natural menos pegajoso y más duradero, dejó caer accidentalmente una mezcla de hule de la India y de azufre en una estufa caliente. Sin embargo, fue Thomas Hancock quien lo bautizó como vulcanización y patentó el proceso en Inglaterra después de evaluar las muestras enviadas por Goodyear. La figura 15-23 muestra cómo los hilos (cadenas cortas) de átomos de azufre pueden enlazar las cadenas poliméricas conforme este último se procesa y conforma a temperaturas de aproximadamente 120 a 180 °C. Los pasos de enlazamiento cruzado pueden incluir reorganizar un átomo de hidrógeno y reemplazar uno o más de los enlaces dobles con sencillos. El proceso de enlazamiento cruzado no es reversible y, en consecuencia, este elastómero no es fácilmente reciclable.

La curva esfuerzo-deformación para un elastómero aparece en la figura 15-24. Virtualmente, toda la curva representa deformación elástica; por tanto, los elastómeros muestran un comportamiento elástico no lineal. Al principio, el módulo de elasticidad se reduce debido al desenrollado de las cadenas. Sin embargo, una vez extendidas las cadenas, cualquier deformación elástica adicional sucede gracias al estiramiento de los enlaces, lo que genera un módulo de elasticidad más elevado.

El número de enlaces cruzados determina la elasticidad del hule o la cantidad de azufre que se ha agregado al material. Las adiciones de azufre bajas dejan al hule blando y flexible; por ejemplo, en las bandas elásticas o en los guantes de hule. Al incrementar el contenido de azufre, se

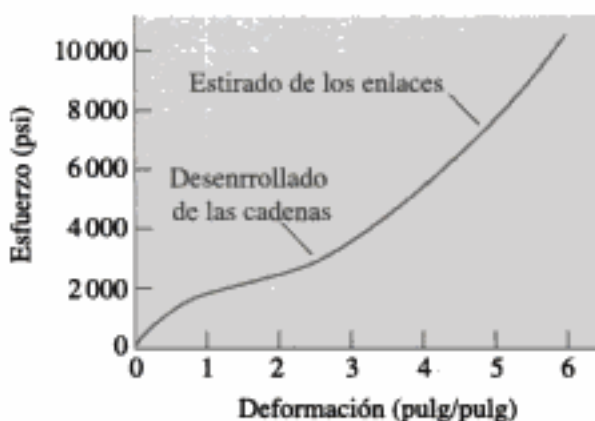
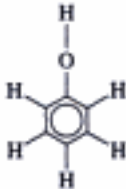
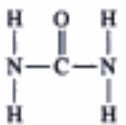
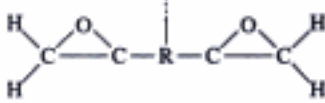
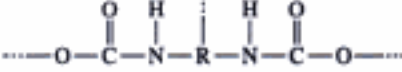
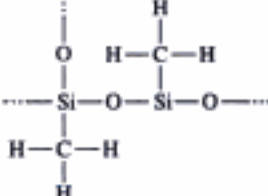


Figura 15-24
Curva esfuerzo-deformación de un elastómero. Prácticamente toda la deformación es elástica; por tanto, el módulo de elasticidad varía conforme cambia la deformación.

TABLA 15-10 ■ Unidades funcionales y aplicaciones de termofijos seleccionados

Polímero	Unidades funcionales	Aplicaciones comunes
Fenólicos		Adhesivos, recubrimientos, laminados
Aminas		Adhesivos, utensilios de cocina, piezas eléctricas moldeadas
Poliésteres		Piezas eléctricas moldeadas, laminados decorativos, matrices poliméricas en la fibra de vidrio.
Epoxis		Adhesivos, piezas eléctricas moldeadas, matriz para materiales compuestos
Uretanos		Fibras, recubrimientos, espumas, aislantes
Siliconas		Adhesivos, juntas, selladores

sólida o líquida; en algunos casos, se utiliza una resina líquida de dos o tres partes (como en el caso de los dos tubos de pegamento epoxi que utilizamos frecuentemente). El calor, la presión, la mezcla de varias resinas y otros métodos inician el proceso de enlaces cruzados. Los enlaces cruzados no son reversibles; una vez formados, los termofijos no pueden reutilizarse o reciclarse convenientemente.

Los grupos funcionales para varios polímeros termoestables comunes aparecen resumidos en la tabla 15-10; en la tabla 15-11 se dan sus propiedades representativas.

Fenólicos Los fenólicos, que son los termofijos de uso más común, se utilizan con frecuencia como adhesivos, recubrimientos, laminados y componentes moldeados para aplicaciones eléctricas o de motores.

La Baquelita™ es uno de los termofijos fenólicos más comunes. Una reacción de condensación que une las moléculas de fenol y de formaldehído produce la resina fenólica lineal inicial (Fig. 15-26). El átomo de oxígeno de la molécula de formaldehído reacciona con un átomo de hidrógeno en cada una de las dos moléculas de fenol, y se libera agua como subproducto. Entonces, las dos moléculas fenólicas se unen mediante el átomo de carbono restante en el formaldehído.

Este proceso continúa hasta que se forma una cadena lineal de fenol-formaldehído. Sin embargo, el fenol es trifuncional. Después de formada la cadena, existe un tercer sitio en cada anillo de fenol para el enlace cruzado con cadenas adyacentes.

de aplicaciones eléctricas, laminados decorativos, lanchas y otros equipos marinos y como matriz para materiales compuestos, como la fibra de vidrio.

Epoxis Los epoxis son polímeros termoestables formados a partir de moléculas que tienen un anillo cerrado $C-O-C$. Durante la polimerización, los anillos $C-O-C$ se abren y los enlaces se reorganizan para unir las moléculas. El más común de los epoxis comerciales está basado en el bisfenol A, al cual se le han añadido dos unidades epóxido. Estas moléculas se polimerizan para producir cadenas y después se les hace reaccionar con agentes aceleradores del curado, para proporcionar los enlaces cruzados. Los epoxis se utilizan como adhesivos, piezas moldeadas rígidas para aplicaciones eléctricas, componentes automotrices, tableros de circuitos, artículos deportivos y como matriz para materiales compuestos reforzados de fibra de alto rendimiento para uso aeroespacial.

Poliimidas Las poliimidas muestran una estructura en anillo que contiene un átomo de nitrógeno. Un grupo especial, las bismaleimidas (BMI), es importante en la industria aeronaval y aeroespacial. Pueden operar de manera continua a temperaturas de 175 °C y no se desintegran hasta alcanzar los 460 °C.

Interpenetración de redes de polímeros Algunos materiales poliméricos especiales se pueden producir cuando las cadenas termoplásticas lineales se entrelazan a través de una estructura termoestable, formando **redes de polímeros interpenetrantes**. Por ejemplo, las cadenas de nylon, acetal y polipropileno pueden penetrar en un termofijo de silicona con enlaces cruzados. En sistemas más avanzados se pueden producir dos estructuras termoestables interpenetrantes.

15-11 Adhesivos

Los adhesivos son polímeros que se utilizan para unir otros polímeros, metales, materiales cerámicos, materiales compuestos o combinaciones de los anteriores. Los adhesivos se utilizan en una diversidad de aplicaciones; los de uso más extenso son los *adhesivos estructurales*, que se utilizan en la industria automotriz, aeroespacial, en aparatos domésticos, en la electrónica, la construcción y en artículos deportivos.

Adhesivos químicamente reactivos Estos adhesivos incluyen a los poliuretanos, los epoxis, los fenólicos, los anaeróbicos y las poliimidas. Los sistemas de un solo componente están constituidos por una sola resina polimérica, que se cura por exposición a la humedad, al calor o, en el caso de los anaeróbicos, por la ausencia del oxígeno. Los sistemas de dos componentes —como los epoxis— se curan al combinarse dos resinas.

Adhesivos por evaporación o por difusión El adhesivo se disuelve en un solvente orgánico o en agua, y se aplica a las superficies que deben unirse. Al evaporarse el portador, el polímero restante crea la unión. Los adhesivos a base de agua tienen preferencia, tanto desde el punto de vista de consideraciones ambientales como de seguridad. El polímero puede estar totalmente disuelto en el agua o consistir en un látex, o una dispersión estable de polímero en el agua. Es común utilizar una amplia variedad de elastómeros, vinilos y acrílicos.

Adhesivos de fusión por calor Estos termoplásticos y elastómeros termoplásticos se funden si se calientan. Al enfriarse, el polímero se solidifica uniendo los materiales. Las temperaturas de fusión de estos adhesivos son de aproximadamente 80 °C a 110 °C, lo que limita el uso de estos adhesivos a temperaturas elevadas. Los adhesivos de fusión por calor de alto rendimiento, como las poliamidas y los poliésteres, pueden utilizarse hasta los 200 °C.

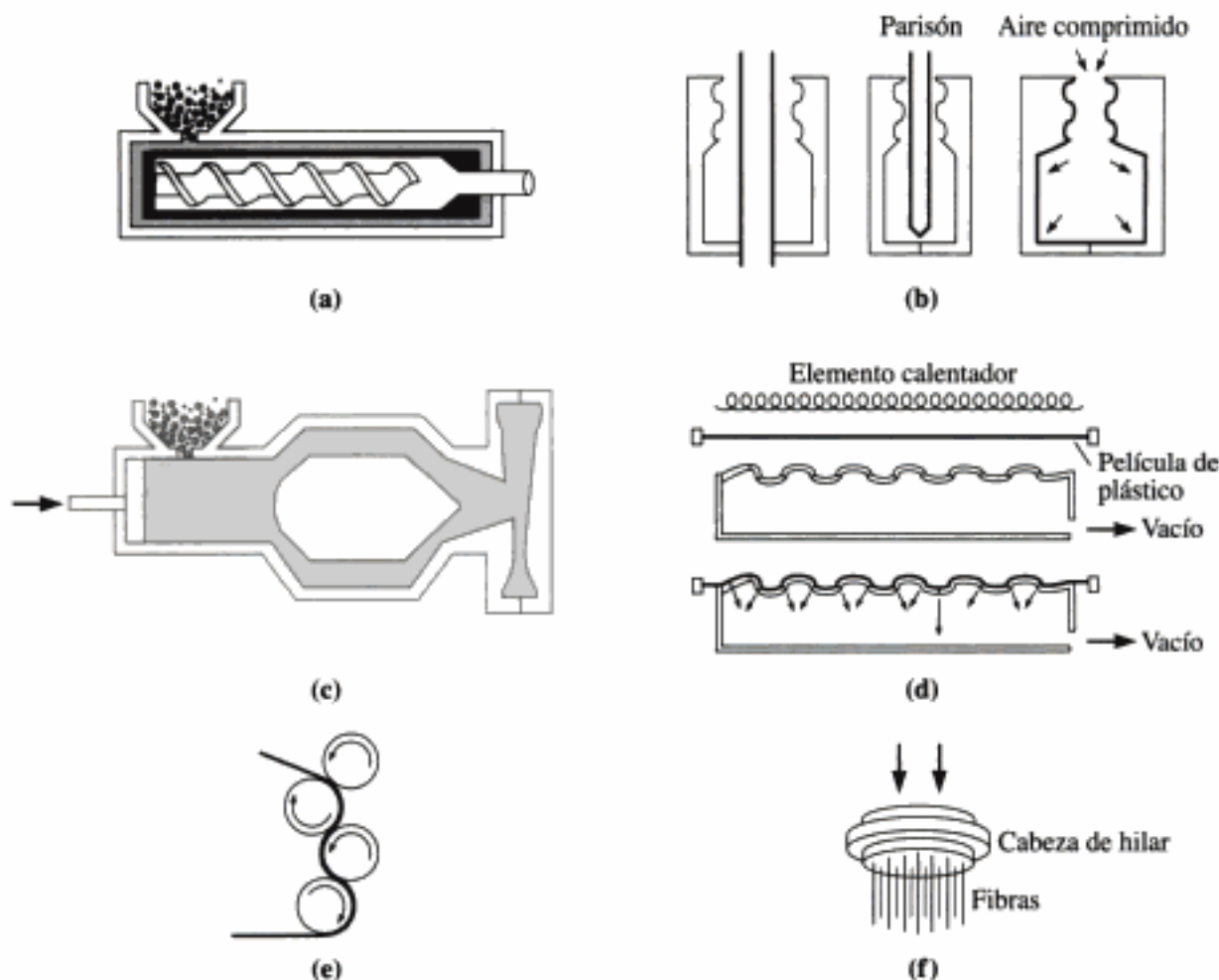


Figura 15-29 Procesos comunes de conformado para los polímeros termoplásticos: (a) extrusión, (b) moldeo por soplado, (c) moldeo por inyección, (d) termoformado, (e) calandrado e (f) hilado.

Calandrado En una calandria se vacía plástico fundido en un juego de rodillos que tienen entre sí una pequeña abertura. Los rodillos, que pueden estar realizados con algún dibujo, presionan el material formando una hoja delgada de polímero, con frecuencia de cloruro de polivinilo. Con este método se fabrican comúnmente losetas para piso y cortinas para regadera.

Hilado Mediante el hilado es posible producir filamentos, fibras e hilos. Se hace pasar al polímero termoplástico a través de un dado que tiene una gran cantidad de pequeñas perforaciones. El dado, conocido como **cabeza de hilar**, puede girar y producir un hilo trenzado. En el caso de algunos materiales, incluyendo el nylon, el hilo puede ser estirado posteriormente con la finalidad de alinear las cadenas de polímero paralelamente al eje del hilo; este proceso aumenta la resistencia de las fibras.

Moldeo por vaciado Muchos polímeros se pueden vaciar en moldes y permitir que solidifiquen. Los moldes pueden ser placas de vidrio para producir láminas individuales de plástico, o bandas de acero inoxidable en movimiento para el vaciado continuo de hojas más delgadas. Un proceso especial de vaciado es el *moldeo centrífugo*, en el cual el plástico fundido se vacía en un molde que gira sobre dos ejes. La fuerza centrífuga empuja al polímero contra las paredes del molde, produciendo una forma delgada, como, por ejemplo, el techo de un vehículo recreativo.

Moldeo por compresión Las piezas moldeadas termofijas se conforman con frecuencia mediante la colocación del material sólido en una matriz caliente antes de presentarse el enlace cruzado. La aplicación de una alta presión a elevada temperatura hace que el polímero se funda, llene la matriz y de inmediato empiece a endurecerse. Mediante este proceso, pueden producirse pequeños receptáculos eléctricos así como salpicaderas, cofres y paneles laterales para automóviles (Fig. 15-30).

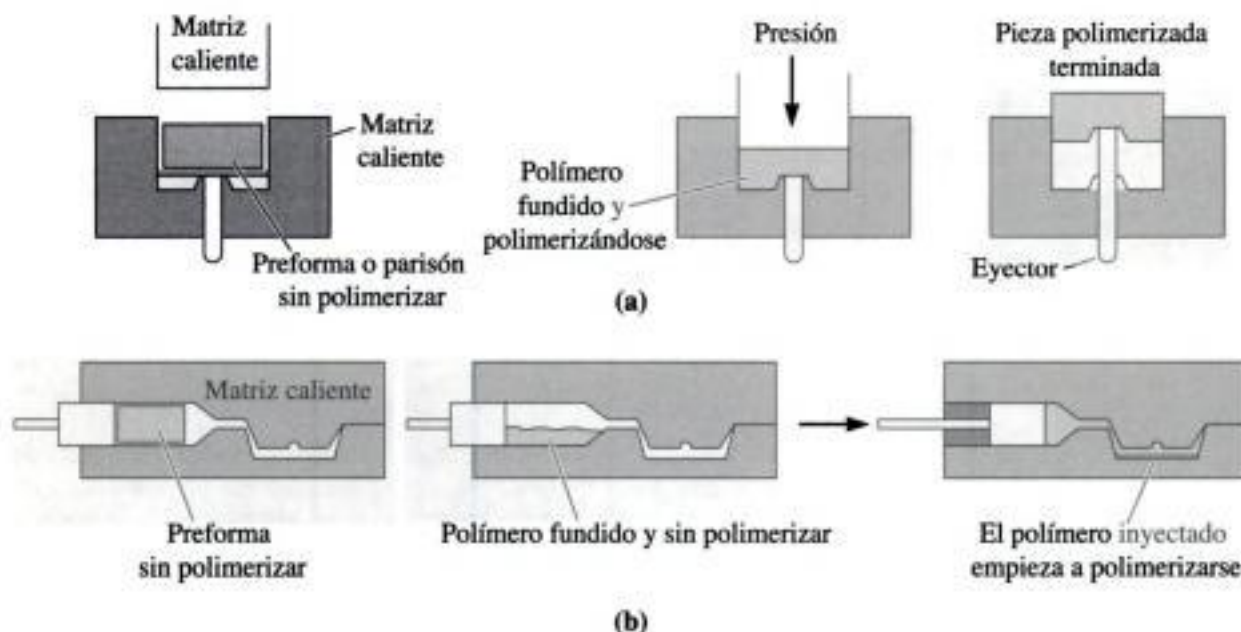


Figura 15-30 Procesos comunes de formado para polímeros termoplásticos: (a) moldeo por compresión y (b) moldeo por transferencia.

Moldeo por transferencia Se utiliza en este moldeo una doble cámara para la transferencia de polímeros termoestables. El polímero se calienta bajo presión en una de las cámaras. Después de fundirse, se inyecta en la cavidad del dado anexo. Este proceso permite obtener algunas de las ventajas del moldeo por inyección para los polímeros termofijos (Fig. 15-30).

Moldeo por inyección por reacción (RIM, por sus siglas en inglés) Los polímeros termoestables en forma de resina se inyectan primero en un mezclador y de ahí directamente a un molde caliente para obtener una figura. En el molde ocurren simultáneamente tanto el conformado como el fraguado. En el moldeo por inyección por reacción reforzada (RRMI, por sus siglas en inglés), un material de refuerzo formado por partículas o por fibras cortas se introduce en la cavidad del molde y se impregna de resinas líquidas para producir un material compuesto. Mediante este proceso se fabrican defensas y salpicaderas automotrices, así como piezas para muebles.

Espumas Es posible producir productos en forma de espumas con poliestireno, uretanos, polimetilmetacrilato y otros polímeros. El polímero se fabrica en pequeñas esferas que contienen un agente espumante, como, por ejemplo, el pentano. Durante el proceso de preexpansión, las esferas aumentan su diámetro hasta en 50 veces. Las esferas preexpandidas se inyectan entonces en un dado, donde se funden, mediante el uso de vapor, para producir productos excepcionalmente ligeros con densidades de quizá sólo 0.02 g/cm^3 . Los vasos de poliestireno expandido (EPS), material de empaque y material de aislamiento son algunas de las aplicaciones para las espumas. Los bloques de motor en los automóviles Saturn se hacen utilizando un patrón hecho de esferas expandidas de poliestireno.[11]

EJEMPLO 15-10 *Tableros aislantes para uso doméstico*

Se desea diseñar un material que se pueda utilizar para la fabricación de tableros aislantes de aproximadamente cuatro pies de ancho por ocho de alto. El material debe proporcionar un buen aislamiento térmico. ¿Qué material seleccionaría usted?

SOLUCIÓN

Los vidrios tienden a ser buenos aisladores del calor; sin embargo, son pesados, más costosos y frágiles. Los polímeros son ligeros, de fabricación económica y pueden ser buenos aislantes térmicos. Podemos utilizar espuma de poliestireno, ya que el aire incluido en los poros aumenta de manera significativa su eficiencia como aislantes térmicos. Para obtener mejores propiedades mecánicas, podríamos producir espumas con una densidad relativamente alta (en comparación con las espumas utilizadas para hacer los vasos desechables para café). Finalmente, desde un punto de vista de seguridad, queremos asegurarnos de que se agregan a dichas espumas algunos retardantes de flama y de fuego. Estos paneles se hacen utilizando cuentas expandidas de poliestireno que contienen pentano. Para ello se utiliza un proceso de moldeo. Las láminas pueden cortarse en los tamaños requeridos utilizando un alambre de metal caliente.

Reciclado de los plásticos El reciclado es de gran importancia; un análisis completo de todo el proceso queda fuera del alcance de este libro, pero tiene un papel preponderante en nuestra vida diaria. Los materiales se reciclan de muchas maneras; por ejemplo, una porción del polímero que resulta un desecho proveniente de un proceso de manufactura (conocido como remolido) se utiliza en las plantas de reciclaje. El reciclaje de los materiales termoplásticos es relativamente sencillo y se practica extensamente. Obsérvese que muchos de los productos plásticos que encuentra todos los días (bolsas, botellas de refresco, recipientes para yogurt, etc.) tienen un número estampado sobre su superficie. Para los productos PET (símbolo de reciclaje "PETE", a causa de problemas de marcas registradas), el número es el 1. Para el HDPE, policloruro de vinilo (símbolo de reciclaje V), LDPE, PP y PS los números son 2, 3, 4, 5 y 6, respectivamente. Otros plásticos se identifican con el número 7.

Los plásticos termofijos y los elastómeros son más difíciles de reciclar, aunque pueden aun así volver a utilizarse. Por ejemplo, los neumáticos pueden desmenuzarse y utilizarse para preparar pisos de patios de recreo o carreteras más seguras.

A pesar de los enormes esfuerzos para el reciclaje, una gran parte de los terrenos con rellenos contienen plásticos (los más abundantes son los desperdicios de papel). En vista de la característica limitada de los recursos petrolíferos, de la amenaza del calentamiento del globo terráqueo y de la necesidad de llegar a tener un entorno más limpio y más seguro, es importante hacer un uso cuidadoso y procurar el reciclaje de todo tipo de materiales.

RESUMEN

- Los polímeros están hechos a partir de grandes moléculas que se producen uniendo moléculas de menor tamaño llamadas monómeros, mediante reacciones de polimerización por adición o por condensación. Los *plásticos* son materiales basados en compuestos poliméricos, y contienen además muchos otros aditivos que mejoran sus propiedades. Comparados con la mayoría de los metales y de los materiales cerámicos, los plásticos tienen resistencia y rigidez pobres y temperatura de fusión baja; sin embargo, también tienen una densidad baja y una buena resistencia química. Los plásticos se utilizan en una gran diversidad de tecnologías.
- Los materiales termoplásticos tienen cadenas que no están químicamente unidas entre sí, lo que permite que el material pueda ser fácilmente conformado en figuras útiles, que tenga una buena ductilidad y que pueda ser reciclado económicamente. Los termoplásticos pueden tener

Enlace no saturado Enlace covalente doble o incluso triple que une a los átomos en una molécula orgánica. Cuando un solo enlace covalente reemplaza el enlace no saturado, puede ocurrir la polimerización.

Enlaces cruzados La unión de cadenas poliméricas entre sí para la producción de un polímero de red tridimensional.

Envejecimiento Lenta degradación de los polímeros como resultado de una exposición a bajos niveles de calor, oxígeno, bacterias o rayos ultravioleta.

Extensores Aditivos o rellenos para dar volumen a bajo costo a los polímeros.

Funcionalidad Número de sitios en un monómero en los cuales puede ocurrir la polimerización.

Grado de polimerización Peso molecular promedio de un polímero dividido entre el peso molecular del monómero.

Isómero geométrico Molécula que tiene la misma composición, pero no la misma estructura, que otra molécula.

Mero Grupo unitario de átomos y de moléculas que definen un arreglo característico para un polímero. El polímero puede definirse como un material formado a partir de la combinación de varios meros o unidades.

Mezcla de hule o compounding Procesamiento de elastómeros en un dispositivo conocido como mezclador Banbury y seguido por su conformación mediante la extrusión, el moldeo o el recubrimiento por inmersión.

Monómero Molécula a partir de la cual se produce el polímero.

Oligómero Moléculas de bajo peso molecular que contienen dos meros (dímeros) o tres (trímeros).

Parísón Trozo caliente de polímero blando o fundido que es soplado o conformado en una forma útil.

Plástico Material predominantemente polimérico que incluye otros aditivos.

Plastificante Aditivo que, al reducir la temperatura de transición vítrea, mejora la capacidad de conformación de un polímero.

Polimerización por adición Proceso mediante el cual se forman cadenas de polímeros al juntar monómeros sin crear un subproducto.

Polimerización por condensación Mecanismo de polimerización en el cual se condensa una molécula pequeña (por ejemplo, agua, metanol, etc.) como subproducto.

Polímero Material fabricado por moléculas gigantes (o macrocelulares) en forma de cadena con pesos moleculares promedio de 10 000 a más de 1 000 000 g/mol, formado a partir de la unión de muchos meros o unidades mediante enlaces químicos. Los polímeros, por lo general, aunque no siempre, se basan en el carbono.

Polímero lineal Cualquier polímero en el cual las moléculas estén colocadas en forma de cadenas parecidas a espaguetis.

Polímero ramificado Cualquier polímero formado por cadenas que a su vez están organizadas como una cadena principal y cadenas secundarias que se ramifican partiendo de la primera.

Polímeros cristalinos líquidos Cadenas poliméricas excepcionalmente rígidas que actúan como varillas rígidas, incluso por encima de su punto de fusión.

Polímeros termoestables Polímeros con muchos enlaces cruzados para producir una estructura de red tridimensional resistente.

Redes de polímeros interpenetrantes Estructuras poliméricas producidas al entrelazar dos estructuras o redes poliméricas diferentes.

Refuerzo Aditivo para los polímeros diseñados para proporcionar una mejoría significativa en la resistencia. Las fibras son refuerzos comunes.

Relajación de esfuerzos Reducción del esfuerzo que actúa sobre un material a lo largo de un periodo con una deformación constante debida a deformación viscoelástica.

Tacticidad Describe la localización en la cadena de átomos o de grupos de átomos del polímero en monómeros no simétricos.

Temperatura de deflexión Temperatura a la cual un polímero se deformará en cierta cantidad bajo una carga estándar.

Temperatura de degradación Temperatura por arriba de la cual un polímero se quema, carboniza o desintegra.

Temperatura de transición vítrea Rango de temperatura por debajo del cual el polímero amorfo toma una estructura vítrea rígida.

Termoplásticos Polímeros lineales o ramificados en los cuales las cadenas de moléculas no están entrelazadas.

Tiempo de relajación Propiedad de un polímero relacionada con la velocidad a la cual ocurre la relajación del esfuerzo.

Unidad de repetición Unidad estructural que se repite para elaborar un polímero. También se conoce como un *mero*.

Viscoelasticidad Deformación de un material por deformación elástica y por flujo viscoso al aplicársele un esfuerzo.

Vulcanización Cadenas de elastómeros con enlaces cruzados mediante la introducción de azufre u otros productos químicos.

INFORMACIÓN
ADICIONAL

1. STRONG, B.A. *Plastics-Materials and Processing*, 2a. ed., Prentice Hall, 2000.
2. COLLINGS, P.J. y M. HIRD. *Introduction to Liquid Crystals: Chemistry and Physics*, Taylor and Francis, 1997.
3. KULKARNI, V.G. *Polyanilines: Progress in Processing and Properties*, ACS, 1999.
4. ROBERTS, R.M. *Serendipity: Accidental Discoveries in Science*, John Wiley and Sons, 1989.
5. DRONBY, G.J. *Technology of Fluoropolymers*, CRS Press, 2000.
6. PHULÉ, P.P. y T. WOOD. "Sol-Gel Processing of Ceramics", en *Encyclopedia of Advanced Materials*, D. BLOOR, S. MAHAJAN y M. FLEMINGS. Eds., Pergamon, 2001.
7. PLAZEK, D.J. *Comunicación personal*, 2002.
8. VAUGHAN, D. *The Challenger Launch Decision. Risky Technology, Culture, and Deviance at NASA*, Chicago Press, 1996.
9. MAGILL, J. *Se reconoce la discusión técnica*, 2002.
10. HARPER, C.A. *Handbook of Materials Product Design*, 3a. ed., McGraw Hill, 2001.
11. ARCH, P. *Nova Chemicals. Se reconoce la asistencia y la discusión técnica*, 2002.



PROBLEMAS

Sección 15-1 Clasificación de los polímeros

- 15-1 ¿Cuáles son los polímeros lineales y los ramificados?
¿Los termoplásticos pueden ser ramificados?
- 15-2 Defina a) un plástico termoplástico, b) un plástico termofijo, c) elastómeros y d) elastómeros termoplásticos.

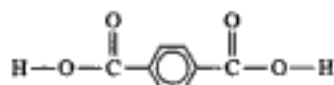
15-3 ¿En qué aplicaciones eléctricas y ópticas se usan polímeros? Explique dando ejemplos.

15-4 ¿Cuáles son las ventajas principales de los plásticos en comparación con los materiales cerámicos, los vidrios y los materiales metálicos?

Sección 15-2 Polimerización por adición

Sección 15-3 Polimerización por condensación

- 15-5 ¿Qué significan los términos polimerización por condensación, polimerización por adición, iniciador y terminador?
- 15-6 Suponga que se introducen 20 g de peróxido de benzoilo en 5 kg de monómero de propileno (véase la tabla 15-4). Si son eficaces 30% de los grupos iniciadores, calcule el grado esperado de polimerización y el peso molecular del polímero polipropileno, si:
- Todas las terminaciones de cadena ocurren por combinación y todas las terminaciones ocurren por desproporción.
 - Suponga que, como iniciador para 10 kg de monómero de cloruro de vinilo, se utiliza el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) (véase la tabla 15-3). Muestre esquemáticamente la forma en que el peróxido de hidrógeno iniciará las cadenas de polímeros. Calcule la cantidad de peróxido de hidrógeno (suponiendo que tiene una eficiencia de 10%) que se requiere para producir un grado de polimerización de 4000 si la terminación de las cadenas ocurre por combinación y por desproporción.
- 15-7 La fórmula del formaldehído es $HCHO$. Dibuje la estructura de la molécula del formaldehído y de su unidad de repetición. Para producir un polímero acetal, ¿polimeriza el formaldehído (véase la tabla 15.4) mediante el mecanismo de adición o por el de condensación? Trate de dibujar un esquema de la reacción y del polímero acetal con base en estos dos mecanismos.
- 15-8 Se desea combinar 5 kg de dimetiltereftalato con etilenglicol para producir poliéster (PET). Calcule la cantidad de etilenglicol requerida, la cantidad de subproducto resultante y la cantidad de poliéster producido.
- 15-9 ¿Esperaría usted que el polipropileno se polimerice a una mayor o menor velocidad que el polimetilmetacrilato? Explique. ¿Esperaría usted que el polietileno se polimerice a una mayor o menor velocidad que el poliéster? Explique.
- 15-10 Se desea combinar 10 kg de etilenglicol con ácido tereftálico para producir un poliéster. El monómero del ácido tereftálico aparece a continuación



Determine el subproducto de la reacción de condensación y calcule la cantidad de ácido tereftálico que

se requiere, la cantidad generada del subproducto y el volumen de poliéster producido.

Sección 15-4 Grado de polimerización

- 15-11 Explique por qué el polietileno de baja densidad es bueno para manufacturar bolsas para el supermercado, y, sin embargo, se debe utilizar el polietileno de peso molecular superelevado donde se requiera de resistencia y de una muy elevada resistencia al desgaste.
- 15-12 Explique por qué, en el procesamiento de polímeros, es necesaria una distribución bimodal del peso molecular.
- 15-13 El peso molecular del polimetilmetacrilato (véase la tabla 15-3) es de 250 000 g/mol. Si todas las cadenas poliméricas tienen una misma longitud,
- calcule el grado de polimerización y
 - el número de cadenas en 1 g del polímero.
- 15-14 El grado de polimerización del politetrafluoroetileno es de 7 500 (véase la tabla 15-3). Si todas las cadenas de polímeros tienen la misma longitud, calcule
- el peso molecular de las cadenas y
 - el número total de cadenas en 1000 g del polímero.
- 15-15 Una cuerda de polietileno pesa 0.25 lb por pie. Si cada cadena contiene 7000 unidades de repetición,
- calcule el número de cadenas de polietileno en un tramo de 10 pies de cuerda y
 - la longitud total de cadenas dentro de la cuerda, suponiendo que los átomos de carbono en cada cadena están separados aproximadamente 0.15 nm.
- 15-16 Se produce un copolímero común al introducir monómeros tanto de etileno como de propileno en la misma cadena. Calcule el peso molecular del polímero producido con 1 kg de etileno y 3 kg de polipropileno, lo que da un grado de polimerización de 5000.
- 15-17 Un análisis de una muestra de poliácridonitrilo (véase la tabla 15-3) muestra que existen seis longitudes de cadenas, con la siguiente cantidad de cadenas para cada longitud. Determine
- el peso molecular promedio por peso y el grado de polimerización y
 - el peso molecular promedio por números y el grado de polimerización.

Número de cadenas	Peso molecular medio de las cadenas (g/mol)
10 000	3 000
18 000	6 000
17 000	9 000
15 000	12 000
9 000	15 000
4 000	18 000

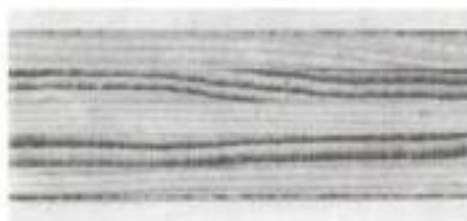
Materiales compuestos: trabajo en equipo y sinergia en los materiales

¿Alguna vez se preguntó...

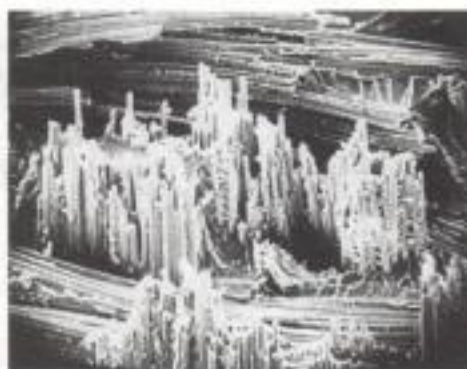
- ...cuáles son algunos de los materiales compuestos existentes naturalmente?
- ...por qué la concha de abalone, principalmente constituida por carbonato de calcio, es mucho más dura que la tiza, que también está constituida por carbonato de calcio?
- ...qué aplicaciones en los artículos deportivos utilizan los materiales compuestos?
- ...por qué los materiales compuestos están siendo utilizados de manera creciente en aeronaves y automóviles?

Los materiales compuestos se forman cuando dos o más materiales o fases se utilizan juntas para dar una combinación de propiedades que no se pueden lograr de otra manera. Los materiales compuestos se pueden seleccionar para obtener combinaciones no usuales de rigidez, peso, desempeño a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad.[1,2] Los materiales compuestos ponen de manifiesto la forma

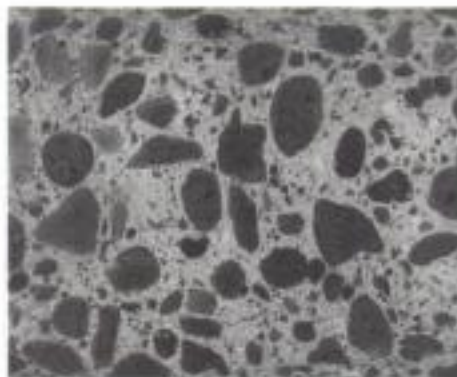
en que materiales distintos pueden trabajar sinérgicamente. La concha del abalone, la madera, el hueso y los dientes son ejemplos de materiales compuestos de origen natural. En la figura 16-1 se muestran las microestructuras de materiales compuestos seleccionados. Un ejemplo de un material que a macroescala sería un material compuesto es el hormigón armado. Los materiales compuestos a microescala incluyen materiales



(a)



(b)



(c)

Figura 16-1 Algunos ejemplos de materiales compuestos: (a) el triplay o madera contrachapada es un compuesto laminar de capas de chapa de madera, (b) la fibra de vidrio es un material compuesto reforzado con fibras de vidrio rígidas y fuertes en una matriz blanda de polímero (175 $\times$) y (c) el concreto, que es un material compuesto de partículas de arena gruesa y de grava en una matriz de cemento (reducida un 50%).

como los plásticos reforzados con carbono o con fibra de vidrio (CFRP o GFRP, por sus siglas en inglés, respectivamente). Éstos ofrecen ventajas significativas en resistencias específicas y su uso es creciente en aviones, componentes electrónicos, automotores y artículos deportivos.[3]

Tal y como se mencionó en los capítulos 11 y 12, las aleaciones endurecidas por dispersión (como los aceros) y endurecidas por precipitación son ejemplos de materiales tradicionales **nanocompuestos**. En un material nanocompuesto, la **fase dispersa** consiste en partículas a nanoescala distribuidas en una **fase matriz**. En esencia, se ha aplicado el mismo concepto al desarrollar lo que se describe como **materiales nanocompuestos híbridos, orgánicos e inorgánicos**. Éstos son los materiales en los cuales la estructura molecular o microestructura de los materiales compuestos consiste en una parte inorgánica o bloque y un bloque orgánico.[4,5] La idea no es muy distinta de la formación de los bloques poliméricos (capítulo 15). Con frecuencia, éstos se preparan utilizando el proceso sol-gel, como se mencionó en el capítulo 14.[6,7] Éstos y otros materiales compues-

tos funcionales pueden dar combinaciones inusuales de propiedades electrónicas, magnéticas u ópticas. Por ejemplo, un material dieléctrico poroso preparado utilizando vidrios inorgánicos separados por fases tiene una constante dieléctrica inferior a la del mismo material sin porosidad. Un polímero transparente, que responde a un campo magnético, también puede prepararse a partir de materiales compuestos. Las losas del transbordador espacial hechas de fibras de sílice son ligeras porque están constituidas de fibras de sílice y de aire, y exhiben una conductividad térmica muy pequeña. Las dos fases en estos ejemplos serían los materiales cerámicos y el aire. Muchos materiales cerámicos vítreos son compuestos a nanoescala de diferentes fases de materiales cerámicos. Muchos plásticos también pueden considerarse como materiales compuestos. Por ejemplo, el Dylark™ es un material compuesto de anhídrido maleico y un copolímero del estireno. Contiene negro de humo para aumentar su rigidez y para protegerlo contra los rayos ultravioleta. También contiene fibras de vidrio a fin de aumentar el módulo de Young y hule para su tenacidad.[8] Las resinas

epóxicas cargadas con plata proporcionan conductividades térmicas superiores que las correspondientes a las resinas epóxicas solas. Algunos materiales dieléctricos se fabrican utilizando múltiples fases, de forma que las propiedades dieléctricas generales de interés (por ejemplo, la constante dieléctrica) no cambien de manera apreciable con la temperatura (dentro de un cierto rango). De manera similar, muchos materiales compuestos se preparan utilizando materiales magnéticos y ópticos. Algunas estructuras compuestas pueden estar formadas de materiales diferentes organizadas en capas diferentes. Esto conduce a lo que se conoce como materiales y estructuras graduadas. Por ejemplo, el recubrimiento de zirconia estabilizada con itrio (YSZ, de *yttria stabilized zirconia*) de un aspa de turbina tendrá otras capas intermedias que aportan la unión con el material del aspa de la turbina. El recubrimiento YSZ mismo se elabora utilizando un rociado de plasma o cualquier otra técnica, y contiene ciertos niveles de porosidad que son esenciales para dar protección contra temperaturas elevadas.[9] De manera similar, los diferentes recubrimientos existentes en un vidrio son ejemplos de estructuras compuestas.[10] Por tanto, el concepto del uso de los materiales compuestos es genérico y se puede aplicar en las escalas macro, micro y nano.

En los materiales compuestos son importantes las propiedades y las fracciones volumétricas de cada fase individual. También es muy importante la conectividad de las fases. Por lo común, la **fase matriz** es la fase continua y la otra fase se dice que es la fase dispersa. Así, el término "matriz metálica" indica un material metálico utilizado para formar la fase continua.

La conectividad se refiere a la forma en que dos o más fases están interconectadas en el material compuesto. Newnham describió un modelo de conectividad para ilustrar las conectividades de materiales compuestos funcionales.[11] Los materiales compuestos suelen clasificarse en función de la forma o la naturaleza de la fase dispersa (por ejemplo, materiales compuestos reforzados con partículas, filamentos o con fibras). Los **filamentos** son como las fibras, aunque su tamaño es mucho más pequeño. La unión entre las partículas, filamentos o fibras y la matriz también es muy importante. En los materiales compuestos estructurales se usan moléculas poliméricas conocidas como "agentes de acoplamiento". Estas moléculas forman enlaces con la fase dispersa y se integran también en la fase matriz continua.

En este capítulo nos enfocaremos principalmente en los materiales compuestos utilizados en aplicaciones estructurales o mecánicas. Los materiales compuestos se pueden organizar en tres clases: particulados, con fibras y laminares, con base en las formas de los materiales (Fig. 16-1). El concreto, una mezcla de cemento y de grava, es un material compuesto particulado; la fibra de vidrio, con fibras de vidrio incrustadas en un polímero, es un material compuesto reforzado con fibras; y el triplay o madera contrachapada, con capas alternas de chapa de madera, es un compuesto laminar. Si las partículas de refuerzo están uniformemente distribuidas, los materiales compuestos particulados tienen propiedades isotrópicas; los materiales compuestos con fibras pueden ser isotrópicos o anisotrópicos; los compuestos laminares siempre tienen un comportamiento anisotrópico.

16-1

Materiales compuestos endurecidos por dispersión

Un grupo especial de materiales nanocompuestos endurecidos por dispersión y que contienen partículas de 10 a 250 nm de diámetro se clasifican como materiales compuestos particulados. Estos **dispersoides**, comúnmente un óxido metálico, se introducen en la matriz por medios distintos a las transformaciones de fase tradicionales (capítulos 11 y 12). A pesar de que las pequeñas partículas no son coherentes en relación con la matriz, bloquean el movimiento de las dislocaciones y producen un efecto endurecedor pronunciado.

A la temperatura ambiente, los materiales compuestos endurecidos por dispersión pueden ser más débiles que las aleaciones de endurecimiento por envejecimiento tradicionales, que contienen un precipitado coherente. Sin embargo, dado que los materiales compuestos no se

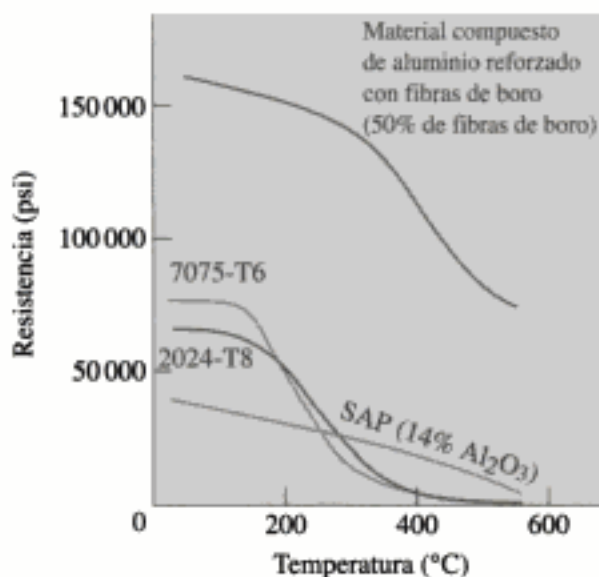


Figura 16-2

Comparación de la resistencia de cedencia del material compuesto de polvo de aluminio sinterizado endurecido por dispersión (SAP, de *sintered aluminum powder*), con el de dos aleaciones de aluminio bifásicas de alta resistencia convencionales. El material compuesto tiene ventaja por encima de aproximadamente 300 °C. Como punto de comparación, se muestra un material compuesto de aluminio reforzado con fibras.

ablandan de manera catastrófica por sobreenvejecimiento, sobrerevenido, crecimiento de granos o engrosamiento de la fase dispersa, la resistencia de los mismos se reduce sólo de manera gradual al incrementarse la temperatura (Fig. 16-2). Además, su resistencia a la termofluencia es superior a la de los metales y las aleaciones.

El dispersoide debe tener una baja solubilidad en la matriz y no debe reaccionar químicamente con la misma, pero una pequeña cantidad de solubilidad podría ayudar a mejorar los enlaces entre el dispersante y la matriz. El óxido de cobre (Cu_2O) se disuelve en el cobre a altas temperaturas; por tanto, el sistema Cu_2O -Cu no resultaría eficaz. Sin embargo, el Al_2O_3 sí logra un material endurecido por dispersión eficaz.

Ejemplos de materiales compuestos endurecidos por dispersión La tabla 16-1 muestra una lista de algunos materiales de interés. Quizás el ejemplo clásico es el material compuesto de polvo de aluminio sinterizado o SAP. Éste tiene una matriz de aluminio endurecida con hasta 14% de Al_2O_3 . El material compuesto se conforma utilizando metalurgia de polvos. En un primer método se mezclan polvos de aluminio y de alúmina, se compactan a alta presión y se sinterizan. En un segundo método, el polvo de aluminio se trata para agregar una película continua de óxido en cada partícula. Una vez compactado el polvo, durante el sinterizado, la película de óxido se rompe en minúsculas escamas rodeadas por el metal de aluminio.

TABLA 16-1 ■ Ejemplos y aplicaciones de materiales compuestos endurecidos por dispersión

Sistema	Aplicaciones
Ag-CdO	Materiales para contactos eléctricos
Al- Al_2O_3	Uso posible en reactores nucleares
Be-BeO	Reactores aeroespaciales y nucleares
Co- ThO_2 , Y_2O_3	Posible uso en materiales magnéticos resistentes a la termofluencia
Ni-20% Cr- ThO_2	Componentes de motores turborreactores
Pb-PbO	Rejillas para batería
Pt- ThO_2	Filamentos, componentes eléctricos
W- ThO_2 , ZrO_2	Filamentos, calefactores

$$f_{wc} = \frac{75/15.77}{75/15.77 + 15/4.94 + 5/14.5 + 5/8.9} = \frac{4.76}{8.70} = 0.547$$

$$f_{Tic} = \frac{15/4.94}{8.70} = 0.349$$

$$f_{Tic} = \frac{5/14.5}{8.70} = 0.040$$

$$f_{Co} = \frac{5/8.90}{8.70} = 0.064$$

A partir de la regla de las mezclas, la densidad del material compuesto es

$$\rho_c = \sum (f_i \rho_i) = (0.547)(15.77) + (0.349)(4.94) + (0.040)(14.5) + (0.064)(8.9) = 11.50 \text{ g/cm}^3$$

Abrasivos Los discos de rectificado y de corte se elaboran partiendo de la alúmina (Al_2O_3), del carburo de silicio (SiC) y del nitruro de boro cúbico (CBN). Para obtener tenacidad, las partículas abrasivas están unidas mediante una matriz vítrea o polimérica. Los abrasivos de diamante normalmente están unidos en una matriz metálica. Conforme se desgastan las partículas duras, éstas se fracturan o se desprenden de la matriz poniendo al descubierto nuevas superficies de corte.

Contactos eléctricos Los materiales que se utilizan en los contactos eléctricos de los interruptores y relevadores deben tener una buena combinación de resistencia al desgaste y conductividad eléctrica; de otra manera, los contactos se erosionan causando mal contacto y arqueo. La plata reforzada con tungsteno proporciona esta combinación de características. Se elabora un compacto de polvo de tungsteno utilizando procesos convencionales de metalurgia

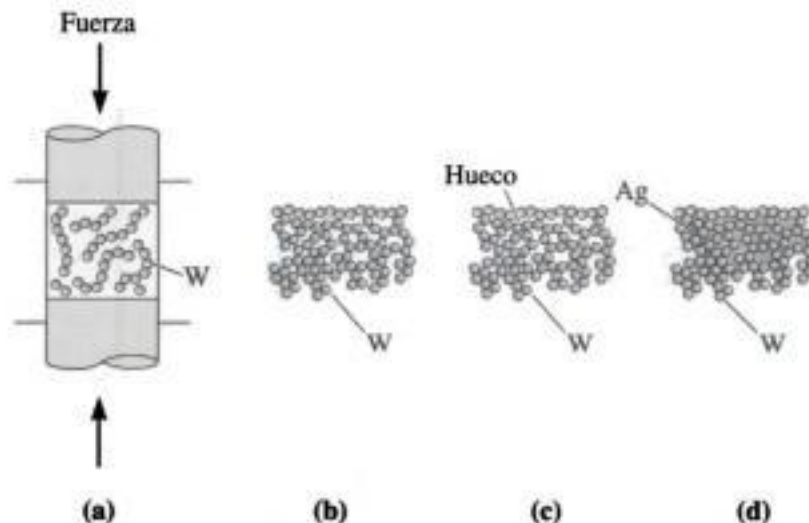


Figura 16-5 Pasos para la producción de un material compuesto eléctrico de plata-tungsteno: (a) se comprimen los polvos de tungsteno, (b) se produce un producto compacto de baja densidad, (c) el sinterizado une los polvos de tungsteno y (d) se infiltra plata líquida en los poros entre partículas.

de los polvos (Fig. 16-5), para producir una porosidad muy interconectada. Después se infiltra plata líquida mediante un vacío, a fin de llenar los huecos interconectados. Tanto la plata como el tungsteno son continuos. De esta manera, la plata pura conduce la corriente con eficiencia, en tanto el tungsteno duro aporta la resistencia al desgaste.

EJEMPLO 16-3 *Material compuesto plata-tungsteno*

Para producir contactos eléctricos se elabora un material compuesto plata-tungsteno fabricando, primeramente, un tungsteno poroso mediante metalurgia de los polvos e infiltrando después plata pura en los poros. La densidad del compacto de tungsteno antes de la infiltración es de 14.5 g/cm^3 . Calcule la fracción volumétrica de la porosidad y el porcentaje de peso final de plata en el compacto después de la infiltración.

SOLUCIÓN

Las densidades del tungsteno puro y de la plata pura son 19.3 y 10.49 g/cm^3 , respectivamente. Podemos suponer que la densidad de un poro es igual a cero, por lo que, de acuerdo con la regla de las mezclas:

$$\begin{aligned}\rho_c &= f_w \rho_w + f_{\text{poro}} \rho_{\text{poro}} \\ 14.5 &= f_w (19.3) + f_{\text{poro}} (0) \\ f_w &= 0.75 \\ f_{\text{poro}} &= 1 - 0.75 = 0.25\end{aligned}$$

Después de la infiltración, la fracción volumétrica de la plata es igual a la fracción volumétrica de los poros:

$$\begin{aligned}f_{\text{Ag}} &= f_{\text{poro}} = 0.25 \\ \text{Peso\% Ag} &= \frac{(0.25)(10.49)}{(0.25)(10.49) + (0.75)(19.3)} \times 100 = 15.3\%\end{aligned}$$

Esta solución supone que todos los poros están abiertos o interconectados.

Polímeros Muchos polímeros para ingeniería, que contienen rellenos y dilatantes, son materiales compuestos particulados. Un ejemplo clásico es el negro de humo en el hule vulcanizado. El negro de humo lo constituyen minúsculos esferoides de carbono de sólo 5 a 500 nm de diámetro. El negro de humo mejora la resistencia, la rigidez, la dureza, la resistencia al desgaste, la resistencia a la degradación debida a los rayos ultravioleta y la resistencia del hule a la temperatura. Como se dijo en el capítulo 15, al hule se le agregan nanopartículas de sílice para aumentar su rigidez.[12.13]

A fin de lograr que se requiera una cantidad más reducida del polímero, más costoso, se agregan extensores, como carbonato de calcio (CaCO_3), esferas sólidas de vidrio y diversas arcillas. Los extensores posiblemente hacen más rígido al polímero, incrementan la dureza y la resistencia al desgaste, incrementan la conductividad térmica, o bien mejoran la resistencia a la termofluencia; sin embargo, normalmente se reducen la resistencia y la ductilidad (Fig. 16-6). Si se agregan esferas de vidrio huecas, se puede conseguir el mismo cambio en las propiedades y al mismo tiempo reducir de manera significativa el peso del material compuesto. Se pueden obtener otras propiedades especiales. En los polímeros se agregan partículas de elastómeros para mejorar la tenacidad (por ejemplo, Dylark™). El polietileno puede ser cargado con polvos metálicos, como el plomo, para mejorar la absorción de productos de la fisión en aplicaciones nucleares. En el siguiente ejemplo se ilustra el diseño de un material compuesto polimérico.

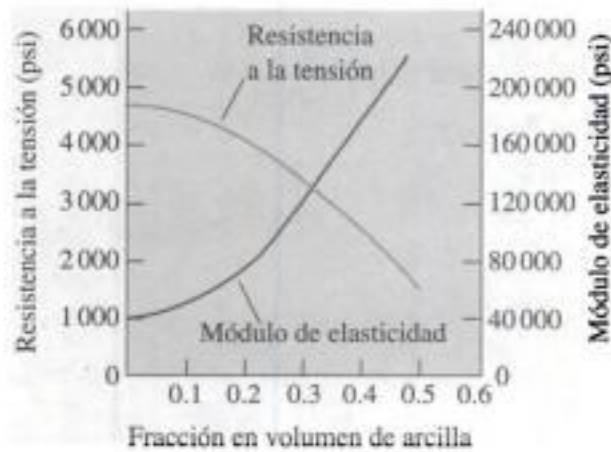


Figura 16-6 Efecto de la arcilla sobre las propiedades del polietileno.

EJEMPLO 16-4 Diseño de un material compuesto polimérico particulado

Diseñe un material compuesto de polietileno relleno de arcilla adecuado para el moldeado por inyección de componentes de bajo costo. La pieza final debe tener una resistencia a la tensión de por lo menos 3 000 psi y un módulo de elasticidad de no menos de 80 000 psi. El polietileno cuesta aproximadamente 50 centavos (dólar) por libra y la arcilla aproximadamente 5 centavos (dólar) por libra. La densidad del polietileno es de 0.95 g/cm³ y la de la arcilla, 2.4 g/cm³.

SOLUCIÓN

En la figura 16-6 encontramos que se requiere una fracción volumétrica de arcilla por debajo de 0.35 para mantener una resistencia a la tensión superior a los 3000 psi, en tanto que se necesita una fracción volumétrica de por lo menos 0.2 para obtener el módulo de elasticidad mínimo. Para reducir el costo al mínimo, usamos toda la arcilla permisible; es decir, una fracción volumétrica de 0.35.

En 1 000 cm³ de partes del material compuesto, existen 350 cm³ de arcilla y 650 cm³ de polietileno, es decir:

$$\frac{(350 \text{ cm}^3)(2.4 \text{ g/cm}^3)}{454 \text{ g/lb}} = 1.85 \text{ lb de arcilla}$$

$$\frac{(650 \text{ cm}^3)(0.95 \text{ g/cm}^3)}{454 \text{ g/lb}} = 1.36 \text{ lb de polietileno}$$

El costo de los materiales es:

$$(1.85 \text{ lb de arcilla})(\$0.05/\text{lb}) = \$0.0925$$

$$(1.36 \text{ lb PE})/(\$0.50/\text{lb}) = \$0.68$$

$$\text{total} = \$0.7725 \text{ por cada } 1\,000 \text{ cm}^3$$

Suponga que el peso es un factor determinante. La densidad del material compuesto es:

$$\rho_c = (0.35)(2.4) + (0.65)(0.95) = 1.4575 \text{ g/cm}^3$$

Quizás sea conveniente sacrificar parte del ahorro, a fin de obtener un menor peso. Si usamos sólo una fracción volumétrica de 0.2 de arcilla, entonces (utilizando el mismo

dúctil. El material de la matriz transmite la fuerza a las fibras, mismas que soportan la mayor parte de la fuerza aplicada. La resistencia del material compuesto puede resultar alta tanto a la temperatura ambiente como a temperaturas elevadas (Fig. 16-2).

Se utilizan muchos tipos de materiales de refuerzo. Durante siglos se usó la paja para reforzar los tabiques de barro. En las estructuras de concreto se introducen varillas de acero de refuerzo. En los materiales compuestos avanzados, basados en matrices de polímeros, metales, materiales cerámicos e incluso materiales compuestos intermetálicos, se utilizan fibras hechas de boro, carbono, polímeros (por ejemplo, aramidas, capítulo 15) y materiales cerámicos, con la finalidad de proporcionar un refuerzo excepcional.

La regla de las mezclas en los materiales compuestos reforzados con fibra Igual que en el caso de los materiales compuestos particulados, la regla de las mezclas dará siempre la densidad de compuestos reforzados:

$$\rho_c = f_m \rho_m + f_f \rho_f, \quad (16-2)$$

donde los subíndices m y f se refieren a la matriz y a las fibras. Obsérvese que $f_m = 1 - f_f$.

Además, la regla de las mezclas predice con exactitud las conductividades térmica y eléctrica de los materiales compuestos reforzados con fibras a lo largo de la dirección de las mismas, si éstas son *continuas* y *unidireccionales*:

$$K_c = f_m K_m + f_f K_f \quad (16-3)$$

$$\sigma_c = f_m \cdot \sigma_m + f_f \cdot \sigma_f \quad (16-4)$$

donde K es la conductividad térmica y σ es la conductividad eléctrica. La energía térmica o eléctrica se puede transferir a través de todo el volumen del material compuesto a una velocidad proporcional a la fracción volumétrica del material conductor. En un material compuesto con una matriz de metal y fibras cerámicas, el grueso de la energía pasaría a través de la matriz; en un material compuesto formado por una matriz polimérica que contenga fibras metálicas, la energía sería transferida a través de las fibras.

Cuando las fibras no son continuas o no son unidireccionales, la sola regla de las mezclas quizás no sea aplicable. Por ejemplo, en un material compuesto de matriz polimérica con fibras metálicas, la conductividad eléctrica sería baja y dependería de la longitud de las fibras, de la fracción volumétrica de las mismas y con qué frecuencia las fibras se tocan entre sí. Lo anterior se expresa usando el concepto de la conectividad de las fases.[11]

Módulo de elasticidad Para determinar el módulo de elasticidad, se utiliza la regla de las mezclas, siempre que las fibras sean continuas y unidireccionales. Paralelo a las fibras, el módulo de elasticidad puede alcanzar valores tan altos como:

$$E_{c\parallel} = f_m \cdot E_m + f_f \cdot E_f \quad (16-5)$$

Sin embargo, cuando el esfuerzo aplicado es muy elevado, la matriz empieza a deformarse y la curva esfuerzo-deformación deja de ser lineal (Fig. 16-8). Dado que ahora la matriz sólo contribuye un poco a la rigidez del material compuesto, el módulo se puede estimar de manera aproximada por:

$$E_{c\parallel} = f_f \cdot E_f, \quad (16-6)$$

Si la carga se aplica perpendicularmente a las fibras, cada uno de los componentes actuará independientemente del otro. Ahora el módulo de elasticidad del material compuesto es:

$$\frac{1}{E_{c\perp}} = \frac{f_m}{E_m} + \frac{f_f}{E_f} \quad (16-7)$$

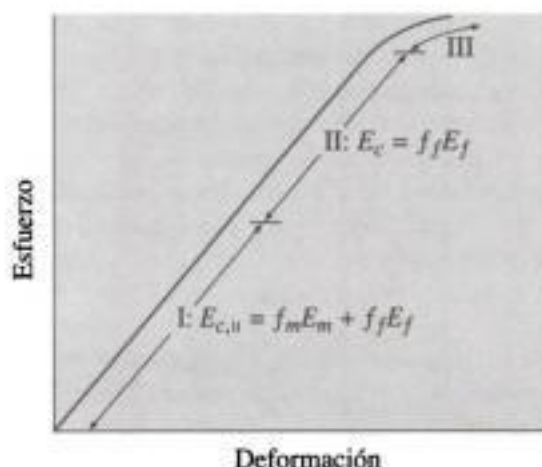


Figura 16-8

Curva esfuerzo-deformación de un material compuesto reforzado con fibras. En esfuerzos reducidos (región I), el módulo de elasticidad se obtiene mediante la regla de las mezclas. En esfuerzos más elevados (región II), la matriz se deforma y la curva ya no sigue la regla de las mezclas.

Nuevamente, si las fibras no son continuas y unidireccionales, la regla de las mezclas no es aplicable.

Los siguientes ejemplos ilustran más estos conceptos.

EJEMPLO 16-5

Regla de las mezclas para materiales compuestos: esfuerzo paralelo a las fibras

Deduzca la ecuación de las mezclas (ecuación 16-5) para el módulo de elasticidad de un material compuesto reforzado con fibras cuando se le aplica un esfuerzo (σ) a lo largo del eje de las fibras.

SOLUCIÓN

La fuerza total que actúa sobre el material compuesto es la suma de las fuerzas que soportan cada uno de los constituyentes:

$$F_c = F_m + F_f$$

Dado que $F = \sigma A$:

$$\begin{aligned}\sigma_c A_c &= \sigma_m A_m + \sigma_f A_f \\ \sigma_c &= \sigma_m \left(\frac{A_m}{A_c} \right) + \sigma_f \left(\frac{A_f}{A_c} \right)\end{aligned}$$

Si las fibras tienen una sección transversal uniforme, la fracción de área es igual a la fracción volumétrica f

$$\sigma_c = \sigma_m \cdot f_m + \sigma_f \cdot f_f$$

De la ley de Hooke, $\sigma = \epsilon E$. Por lo tanto:

$$E_{c,I} \epsilon_c = E_m \epsilon_m f_m + E_f \epsilon_f f_f$$

Si las fibras están unidas rígidamente a la matriz, tanto las fibras como la matriz deberán estirarse en cantidades iguales (condiciones de isodeformación):

$$\begin{aligned}\epsilon_c &= \epsilon_m = \epsilon_f \\ E_{c,I} &= f_m E_m + f_f E_f\end{aligned}$$

EJEMPLO 16-6 *Módulo de elasticidad para los materiales compuestos: esfuerzo perpendicular a las fibras*

Deduzca la ecuación del módulo de elasticidad de un material compuesto reforzado con fibras al aplicársele un esfuerzo en dirección perpendicular al eje de las fibras (ecuación 16-7).

SOLUCIÓN

En este ejemplo, las deformaciones ya no son iguales; en cambio, la suma ponderada de las deformaciones de cada uno de los componentes es igual a la deformación total en el material compuesto, en tanto que en cada componente los esfuerzos son iguales (condición de isoesfuerzo):

$$\begin{aligned}\varepsilon_c &= f_m \varepsilon_m + f_f \varepsilon_f \\ \frac{\sigma_c}{E_c} &= f_m \left(\frac{\sigma_m}{E_m} \right) + f_f \left(\frac{\sigma_f}{E_f} \right)\end{aligned}$$

Dado que $\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f$:

$$\frac{1}{E_{c,\perp}} = \frac{f_m}{E_m} + \frac{f_f}{E_f}$$

Resistencia de los materiales compuestos La resistencia a la tensión de un material compuesto reforzado con fibras (TS_c) depende de la unión entre fibras y matriz. Sin embargo, a veces se utiliza la regla de las mezclas para tener una aproximación de la resistencia a la tensión de un material compuesto que contenga fibras continuas y paralelas:

$$TS_c = f_f TS_f + f_m \sigma_m \quad (16-8)$$

donde TS_f es la resistencia a la tensión de la fibra y σ_m es el esfuerzo que actúa sobre la matriz cuando el material compuesto está deformado hasta el punto en que las fibras se fracturan. Por lo tanto, σ_m no es la resistencia a la tensión real de la matriz. Otras propiedades, como la ductilidad, propiedades al impacto, a la fatiga y a la termofluencia son difíciles de predecir incluso en el caso de fibras alineadas unidireccionalmente.

EJEMPLO 16-7 *Materiales compuestos de aluminio y boro*

Un aluminio reforzado con boro recubierto con SiC (es decir, Borsic), con 40% en volumen de fibras es un material compuesto importante, ligero y de alta temperatura. Estime la densidad, el módulo de elasticidad y la resistencia a la tensión paralelos al eje de las fibras. También estime el módulo de elasticidad perpendicular a las mismas.

SOLUCIÓN

Las propiedades de cada uno de los componentes aparecen a continuación.

Material	Densidad (g/cm ³)	Módulos de elasticidad (psi)	Resistencia a la tensión (psi)
Fibras	2.36	55 000 000	400 000
Aluminio	2.70	10 000 000	5 000

De la regla de las mezclas:

$$\rho_c = (0.6)(2.7) + (0.4)(2.36) = 2.56 \text{ g/cm}^3$$

$$E_{c,\parallel} = (0.6)(10 \times 10^6) + (0.4)(55 \times 10^6) = 28 \times 10^6 \text{ psi}$$

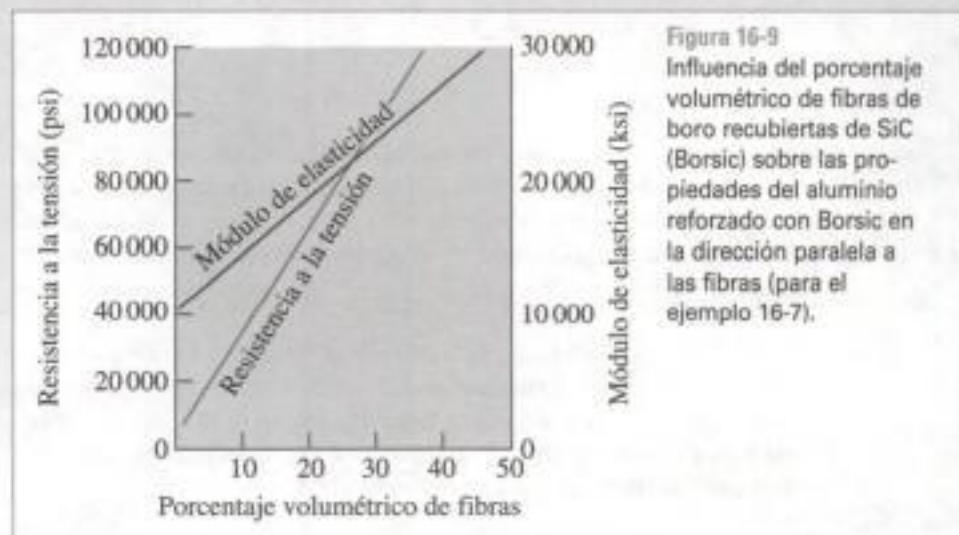
$$TS_c = (0.6)(5000) + (0.4)(400\,000) = 163\,000 \text{ psi}$$

Perpendicularmente a las fibras:

$$\frac{1}{E_{c,\perp}} = \frac{0.6}{10 \times 10^6} + \frac{0.4}{55 \times 10^6} = 0.06727 \times 10^{-6}$$

$$E_{c,\perp} = 14.9 \times 10^6 \text{ psi}$$

En la figura 16-9 se muestran el módulo de elasticidad y la resistencia a la tensión reales paralelos a las fibras. El módulo de elasticidad calculado (28×10^6 psi) es exactamente el mismo que el módulo medido. Sin embargo, la resistencia a la tensión estimada (163,000 psi) es considerablemente superior a la real (aproximadamente 130 000 psi). Observamos también que el módulo de elasticidad es muy anisotrópico, con el módulo perpendicular a la fibra solamente la mitad del módulo paralelo a las mismas.



EJEMPLO 16-8 Materiales compuestos de nylon con fibras de vidrio

Las fibras de vidrio en el nylon proporcionan refuerzo. Si el nylon contiene 30% volumétrico de vidrio-E, ¿qué fracción de la fuerza aplicada soportan las fibras de vidrio?

SOLUCIÓN

El módulo de elasticidad de cada uno de los componentes en el material compuesto es:

$$E_{\text{vidrio}} = 10.5 \times 10^6 \text{ psi} \quad E_{\text{nylon}} = 0.4 \times 10^6 \text{ psi}$$

Si la unión es buena, tanto el nylon como las fibras de vidrio estarán sujetos a un esfuerzo igual, por tanto:

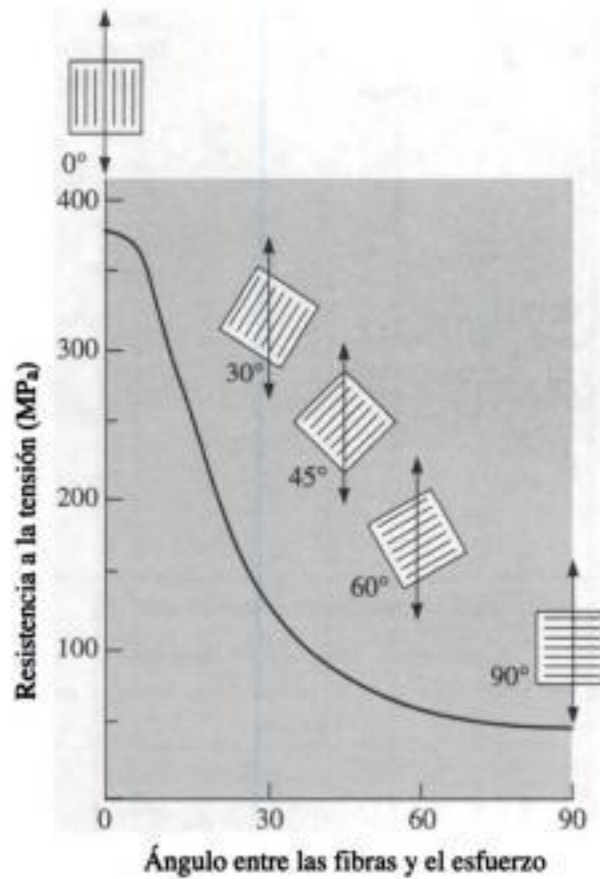


Figura 16-11

Efecto de la orientación de la fibra sobre la resistencia a la tensión de materiales compuestos de epoxi reforzados con fibras de vidrio E.

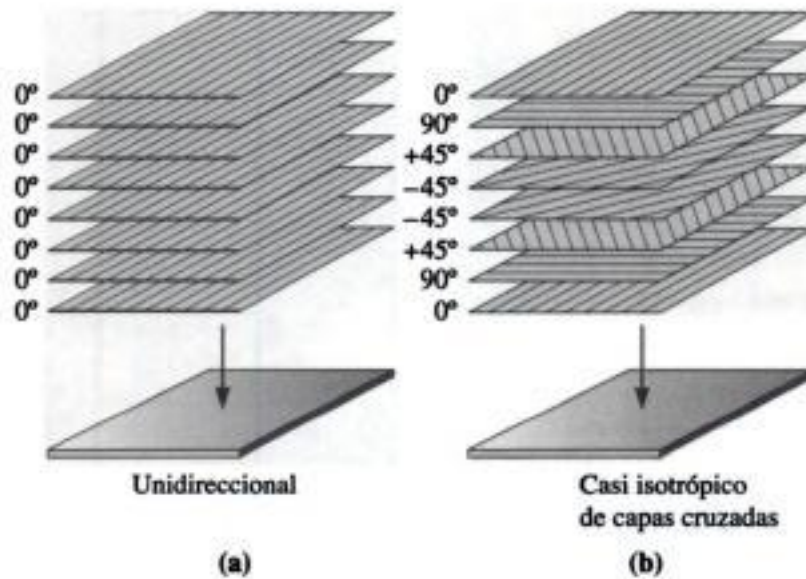


Figura 16-12 (a) Se pueden unir cintas con fibras alineadas para producir una estructura compuesta unidireccional de varias capas. (b) Se pueden unir cintas con fibras alineadas en varias orientaciones para producir un material compuesto casi isotrópico. En este caso, se ha formado un material compuesto $0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$.

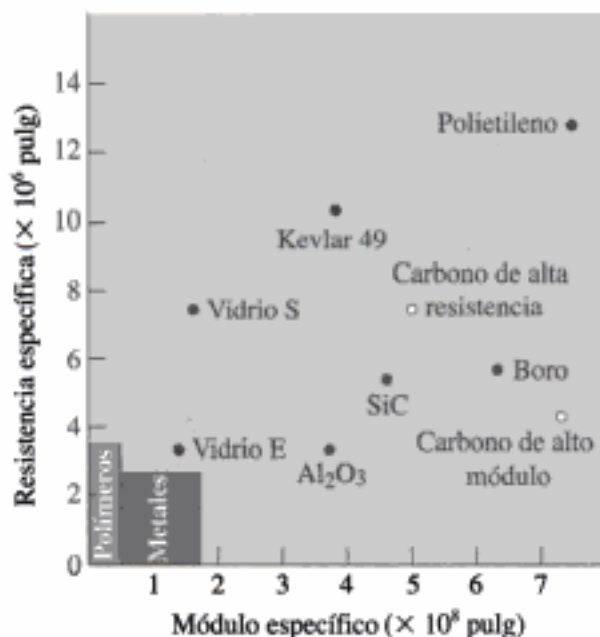


Figura 16-14

Resistencia y módulo específicos de las fibras, comparadas con las de los metales y polímeros.

Las propiedades de fibras comunes aparecen en la tabla 16-2 y en la figura 16-14. Obsérvese que, en la tabla 16-2, la densidad aparece en g/cm^3 . Obsérvese también que $1 \frac{\text{gm}}{\text{cm}^3} = 0.0361 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^3}$.

Por lo general, el módulo específico más alto se presenta en materiales de bajo número atómico y enlaces covalentes, como en el caso del carbono y del boro. Estos dos elementos también tienen alta resistencia y una elevada temperatura de fusión.

Las fibras de aramidas, de las cuales el ejemplo más conocido es el Kevlar™, son polímeros poliamidas aromáticos endurecidos mediante una espina dorsal con anillos de benceno (Fig. 16-15) y son ejemplos de polímeros cristalinos líquidos en los cuales las cadenas de polímeros tienen forma de varillas y son muy rígidas. También están disponibles fibras de polietileno especialmente preparadas. Tanto las fibras de aramidas como las de polietileno tienen excelente resistencia y rigidez, pero su uso está limitado a bajas temperaturas. Debido a su menor densidad, las fibras de polietileno ofrecen una resistencia específica y un módulo específico superior.

Las fibras cerámicas y los filamentos, incluyendo la alúmina, el vidrio y el carburo de silicio, son resistentes y rígidas. Las fibras de vidrio, que son las de uso más común, incluyen a la sílice pura, el vidrio S (25% Al_2O_3 , 100% de MgO y el resto SiO_2), y el vidrio E (18% CaO , 15% Al_2O_3 y el resto SiO_2). A pesar de que son considerablemente más densas que las fibras poliméricas, las fibras cerámicas se pueden utilizar a temperaturas mucho más elevadas. El berilio y el tungsteno, a pesar de que tienen enlaces metálicos, tienen un elevado módulo que los hace atractivos para ciertas aplicaciones en materiales para fibras. El siguiente ejemplo analiza problemas relacionados con el diseño con materiales compuestos.

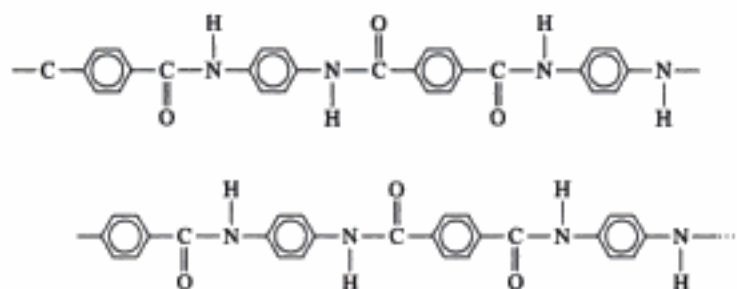


Figura 16-15

Estructura del Kevlar™. Las fibras están unidas mediante enlaces secundarios entre los átomos de oxígeno y de hidrógeno de cadenas adyacentes.

EJEMPLO 16-9 *Diseño de un material compuesto aeroespacial*

Actualmente estamos utilizando una aleación de aluminio 7075-T6 (con módulo de elasticidad de 10×10^6 psi) para fabricar un panel de 500 libras para una aeronave comercial. La experiencia nos ha demostrado que cada reducción de una libra en el peso de la aeronave disminuye el consumo de combustible en 500 galones al año. Diseñe un material para este panel que reduzca el peso y aun así mantenga el mismo módulo específico y resulte económico en los 10 años de vida útil de la aeronave.

SOLUCIÓN

Existen muchos materiales posibles que podrían utilizarse para obtener un ahorro en peso. Como ejemplo, veamos una aleación Al-Li reforzada con fibras de boro en condición T6. Tanto la fibra de boro como la adición de la aleación de litio incrementan el módulo de elasticidad; el boro y la aleación Al-Li también tienen densidades inferiores a las de las aleaciones comunes de aluminio. El módulo específico de la aleación actual 7075-T6 es:

$$\begin{aligned} \text{Módulo específico} &= \frac{(10 \times 10^6 \text{ psi})}{\left[\frac{\left(2.7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) \left(2.54 \frac{\text{cm}}{\text{pulg}}\right)^3}{454 \left(\frac{\text{g}}{\text{lb}}\right)} \right]} \\ &= 1.03 \times 10^8 \text{ pulg} \end{aligned}$$

La densidad de las fibras de boro es de aproximadamente 2.36 g/cm^3 (0.085 lb/pulg^3) y la de una aleación típica Al-Li es aproximadamente 2.5 g/cm^3 (0.09 lb/pulg^3). Si utilizamos fibras de boro en una fracción volumétrica de 0.6 dentro del material compuesto, entonces la densidad, el módulo de elasticidad y el módulo específico de este material compuesto son:

$$\rho_c = (0.6)(0.085) + (0.4)(0.09) = 0.087 \text{ lb/pulg}^3$$

$$E_c = (0.6)(55 \times 10^6) + (0.4)(11 \times 10^6) = 37 \times 10^6 \text{ psi}$$

$$\text{Módulo específico} = \frac{37 \times 10^6}{0.087} = 4.25 \times 10^8 \text{ pulg}$$

Si el módulo específico fuera el único factor que influyera en el diseño del componente, el espesor de la pieza podría reducirse en un 75% y su peso pasaría a ser 125 lb en lugar de 500 lb. El ahorro en peso sería entonces de 375 lb o, lo que es lo mismo, $(500 \text{ galones/lb})(375 \text{ lb}) = 187\,500$ galones al año. Con un costo de aproximadamente \$2.00 por galón, se podría alcanzar un ahorro de \$375 000 en combustible cada año, es decir \$3.75 millones durante la vida de la aeronave.

Ésta es, obviamente, una comparación optimista, ya que otros factores, como la resistencia o problemas de fabricación, podrían impedir que este componente se fabrique con un espesor tan pequeño como se sugiere. Además, el elevado costo de las fibras de boro (superior a \$300/lb), así como costos más elevados de manufactura del material compuesto en comparación con el aluminio 7075 reducirían este ahorro.

Propiedades de las matrices La matriz soporta las fibras y las mantiene en su posición correcta, transfiere la carga a las fibras fuertes, protege las fibras contra daños durante su manufactura y uso en el material compuesto y evita la propagación de las grietas en las fibras hacia todo el material compuesto. La matriz, por lo general, es la que aporta el control principal

3 000 °C, la resistencia a la tensión se reduce, mientras que el módulo de elasticidad se incrementa (Fig. 16-19). El estirado de los filamentos de carbono en ciertos momentos específicos de la carbonización puede producir las orientaciones preferidas deseables en el filamento final.

Los filamentos son cristales individuales con relaciones de forma de 20 a 1 000. Dado que los filamentos no contienen ninguna dislocación móvil, el deslizamiento no es posible y exhiben resistencias excepcionalmente elevadas. En vista del procesamiento complejo que se requiere para la producción de las fibras, su costo puede ser bastante alto.

Arreglo de las fibras Los filamentos excepcionalmente finos se reúnen en forma de hebras, hilos o mechas. En los **hilos** se retuercen hasta 10 000 filamentos para producir la fibra. Una **mecha** contiene desde unos cuantos cientos a más de cien mil filamentos sin retorcer (Fig. 16-20). Las **hebras** son paquetes sin retorcer de filamentos, hilos o mechas.

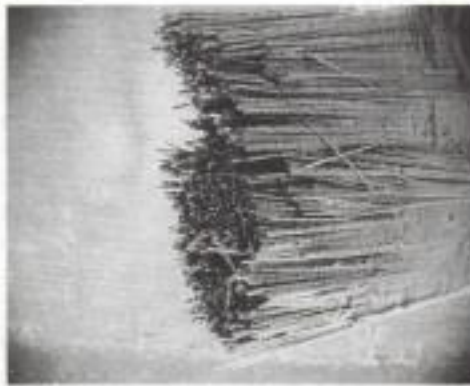


Figura 16-20

Micrografía electrónica de barrido de una mecha de carbono, con muchos filamentos de carbono individuales (200 ×).

Frecuentemente, las fibras se cortan en tramos de un centímetro o menos. Estas fibras, conocidas también como **hilachos**, son fáciles de incorporar en la matriz y son comunes en los materiales compuestos de moldeo de láminas y de moldeo en volumen para materiales compuestos de matriz polimérica. Muchas veces, las fibras están presentes dentro del material compuesto con una orientación al azar o aleatoria.

Para materiales compuestos de matriz polimérica, se pueden procesar fibras largas o continuas en forma de esteras o de telas. Las **esteras** contienen fibras sin tejer orientadas al azar y sujetas apenas por una resina polimérica. Las fibras también se pueden entamar, trenzar y tejer en tejidos bidimensionales o tridimensionales. Después se impregnan con una resina polimérica. En este punto del proceso, las resinas todavía no se han polimerizado completamente; estas esteras o telas se conocen como **prepregs**.

Cuando es necesario introducir fibras alineadas unidireccionalmente en una matriz polimérica, se pueden producir **cintas**. Las fibras individuales se pueden desenrollar desde carretes sobre un mandril, que determina el espaciamiento de las fibras individuales e impregnadas y

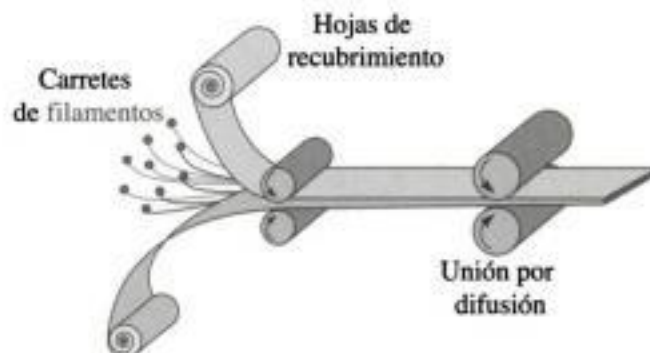


Figura 16-21

Producción de cintas de fibra con encapsulamiento de fibras entre láminas de metal mediante unión por difusión.

preformadas mediante una resina polimérica. Estas cintas, con un espesor de sólo un diámetro de fibra, pueden tener un ancho de hasta 48 pulgadas. La figura 16-21 muestra que las cintas también se pueden fabricar cubriendo las fibras con capas superiores e inferiores de hoja metálica que después se juntan mediante unión por difusión.

Producción del material compuesto Se utiliza una diversidad de métodos para la producción de piezas de material compuesto, dependiendo de la aplicación y de los materiales. Los materiales compuestos reforzados con fibras cortas se elaboran normalmente mezclando las fibras en una matriz líquida o plástica, y utilizando después técnicas relativamente convencionales, como sería el moldeo por inyección para los materiales compuestos en base polimérica o por vaciado, en el caso de materiales compuestos de matriz metálica. Los materiales compuestos con matriz polimérica también se pueden producir utilizando un método de rociado, en el cual se atomizan las fibras cortas junto con una resina sobre una forma y después se deja fraguar.

Sin embargo, se han diseñado técnicas especiales para la producción de materiales compuestos utilizando fibras continuas, ya sea en una forma alineada unidireccionalmente, en estera o en tejido (Fig. 16-22). En técnicas de elaboración manual, las cintas, esteras o tejidos se extienden sobre una forma, saturada con resina polimérica, y se presionan para asegurar un buen contacto y una completa eliminación de la porosidad; finalmente se curan o fraguan. De esta manera, se pueden fabricar carrocerías de automóviles y de camiones de fibras de vidrio, lo cual, por lo común, es una operación lenta y que requiere mucha mano de obra.

Las cintas y las telas también se pueden colocar en un dado y pueden formarse mediante el moldeo por bolsa. Se introducen gases a alta presión o se provoca un vacío, para obligar a que las capas individuales se junten de tal manera que durante el curado se obtenga una buena unión. Utilizando estas técnicas, se han fabricado grandes componentes de matriz polimérica para los fuselajes de las aeronaves militares. En el moldeo con dados macho y hembra, se colocan fibras cortas o esteras en un dado hecho en dos piezas; al cerrarse éste, se obtiene la forma deseada.

El **enrollado de filamentos** se utiliza para producir componentes como recipientes a presión y piezas fundidas para motores a reacción (Fig. 16-23). Las fibras se enrollan alrededor de una forma o de un mandril para formar gradualmente una figura sólida que incluso puede

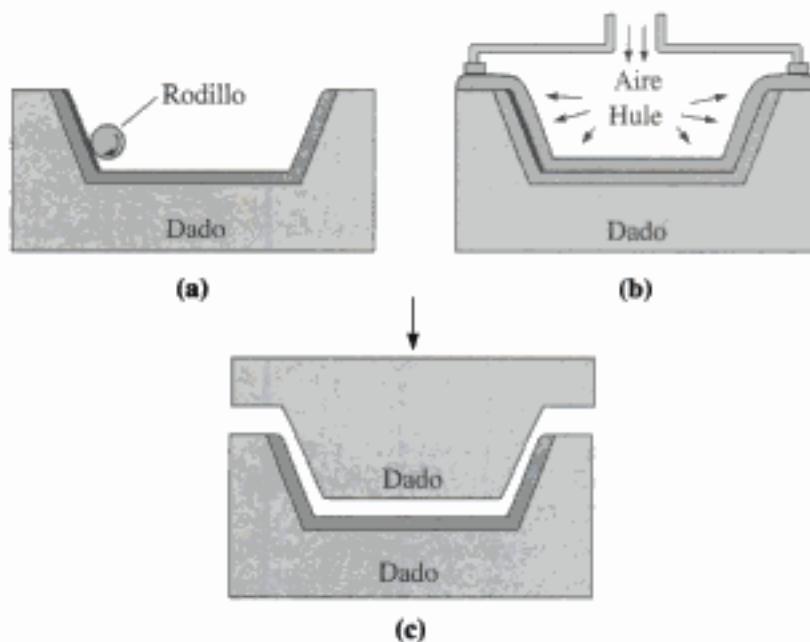


Figura 16-22 Producción de formas de materiales compuestos en dados (a) a mano, (b) mediante moldeo a presión y (c) mediante moldeo con dados macho y hembra.

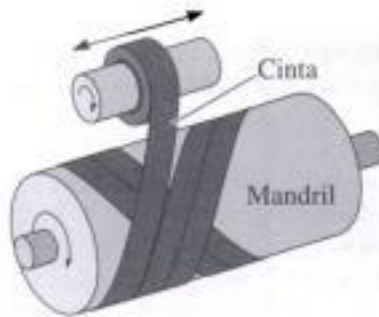


Figura 16-23

Producción de formas de materiales compuestos mediante el enrollado de filamentos.

llegar a tener varios pies de espesor. El filamento puede estar sumergido en la resina de la matriz polimérica antes de su enrollado, o esta resina se puede impregnar alrededor del filamento durante o después del enrollado. El curado o fraguado completa la producción de la pieza.

Pultrusión o extrusión estirada se utiliza para formar un producto de forma simple con sección transversal uniforme, como formas redondas, rectangulares, tuberías, placas o láminas (Fig. 16-24). Las fibras o las esteras son tiradas por carretes, pasadas a través de un baño de resina polimérica para su impregnación y unidas para producir una forma específica antes de entrar en un dado caliente para su curado. El curado o fraguado de la resina se efectúa casi de inmediato, por lo que se fabrica un producto en forma continua. El material extruido puede conformarse subsecuentemente en formas un tanto más complejas, como cañas de pescar, palos de golf y bastones para esquíes.

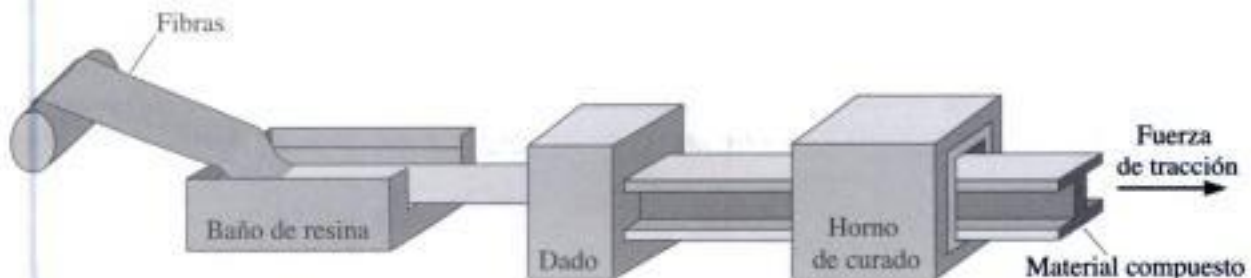


Figura 16-24 Producción de formas de materiales compuestos mediante extrusión y estirado.

Los materiales compuestos de matriz metálica con fibras continuas son más difíciles de producir que los materiales compuestos de resina polimérica. También se pueden utilizar procesos de vaciado o colado que obligan al líquido a pasar alrededor de las fibras por elevación capilar, colado a presión, infiltración por vacío o colada continua. También es posible utilizar varios procesos de compactación en estado sólido.

16-6

Sistemas reforzados con fibra y sus aplicaciones

Antes de terminar nuestro análisis de materiales compuestos reforzados por fibras, veamos el comportamiento y las aplicaciones de algunos de los más comunes de estos materiales. La figura 16-25 compara el módulo y la resistencia específicos de varios materiales compuestos con los de metales y polímeros. Obsérvese que los valores en esta figura son menores que los que aparecen en la figura 16-14, ya que ahora estamos ante el material compuesto, y no sólo ante la fibra.

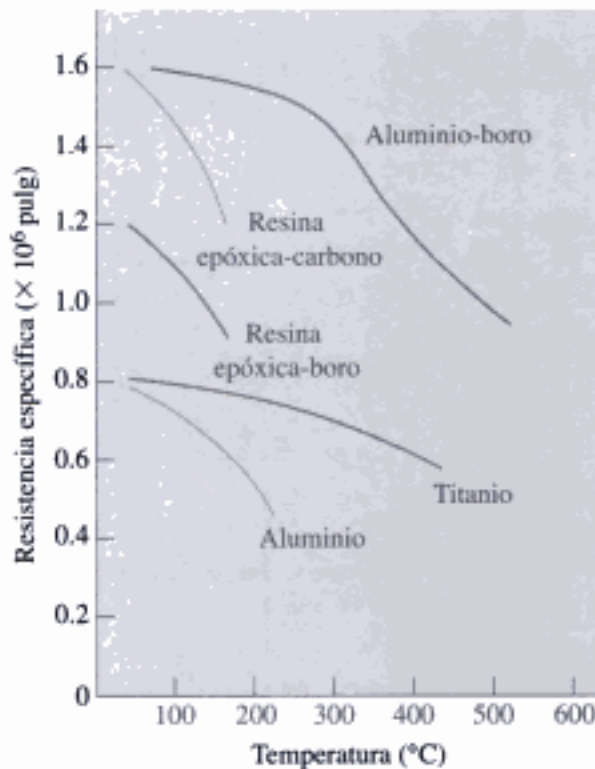


Figura 16-26 Resistencia específica en función de la temperatura para varios materiales cerámicos y para metales.

Una aplicación que es única para las fibras de aramidas es el blindaje. Los materiales compuestos de Kevlar™ proporcionan una mejor protección contra balas que otros materiales; esto los hace adecuados para ropa ligera, a prueba de balas y flexible.

Los materiales compuestos híbridos están hechos con dos o más tipos de fibras. Por ejemplo, las fibras de Kevlar™ se pueden combinar con fibras de carbono, a fin de mejorar la tenacidad de un material compuesto rígido, o bien se puede mezclar el Kevlar™ con fibras de vidrio para mejorar la rigidez. Controlando las cantidades y la orientación de cada fibra, se puede lograr un ajuste particularmente bueno del material compuesto.

También es posible producir materiales compuestos muy tenaces, si se tiene cuidado en la elección de los materiales y de las técnicas de procesamiento. Se puede lograr una mejor tenacidad a la fractura en los materiales compuestos más bien frágiles utilizando fibras largas, amorfas (como PEEK y PPS), en vez de matrices cristalinas o con enlaces cruzados, matrices elastómeras termoplásticas o polímeros de red interpenetrante.

Materiales compuestos de matriz metálica Estos materiales, endurecidos con fibras metálicas o cerámicas, proporcionan una elevada resistencia a altas temperaturas. El aluminio reforzado con fibras de Borsic ha encontrado un extenso uso en aplicaciones aeroespaciales, incluyendo puntales para el transbordador espacial. Ciertas aleaciones con base en cobre se han reforzado con fibras de SiC, para producir hélices de alta resistencia para barcos.

El aluminio se usa comúnmente en los materiales compuestos de matriz metálica. Las fibras de Al_2O_3 refuerzan los pistones de ciertos motores diesel; en aplicaciones aeroespaciales, se usan fibras y filamentos de SiC, incluyendo miembros para mejorar la rigidez y aletas de misiles; y el mástil de la antena de aluminio del telescopio Hubble está reforzado con fibras de carbono. Las fibras poliméricas, debido a sus bajas temperaturas de fusión y de desintegración, por lo general no se utilizan en una matriz metálica. Sin embargo, los *polimets* se fabrican extruyendo en caliente polvos de aluminio y polímeros cristalinos líquidos de alta temperatura de fusión. Una reducción de 1 000 a 1 durante el proceso de extrusión alarga el polímero formando filamentos alineados y une las partículas de polvo de aluminio en una matriz sólida.

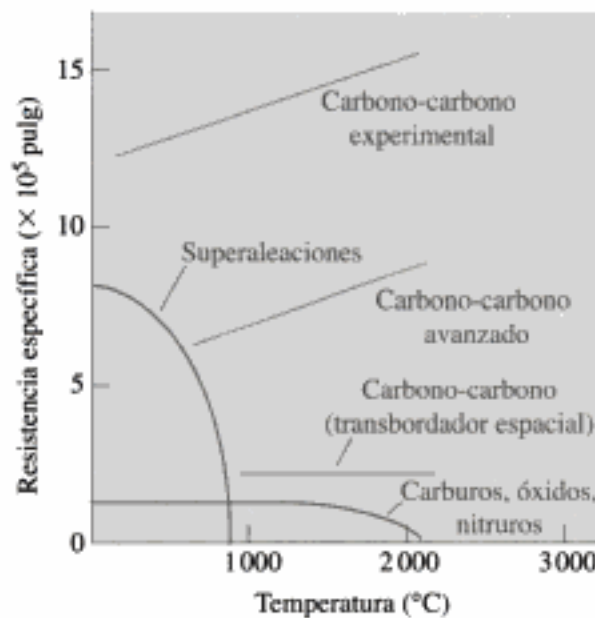


Figura 16-28

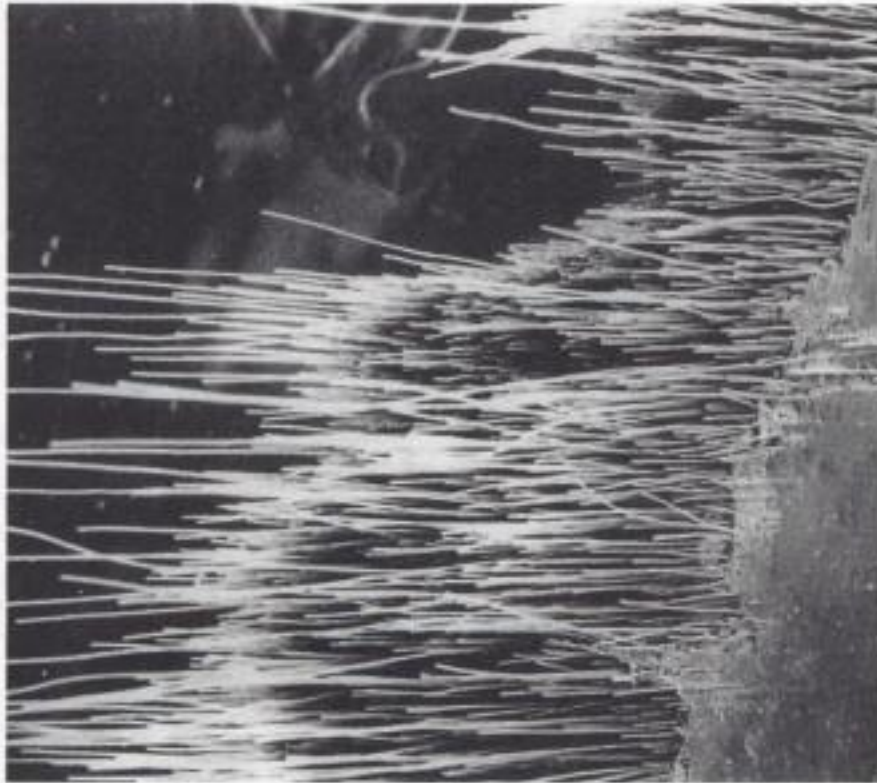
Comparación de las resistencias específicas de varios materiales compuestos con las de otros materiales para altas temperaturas en función de la temperatura.

cubre con carburo de silicio, a fin de proteger el material compuesto carbono-carbono contra la oxidación. Se pueden alcanzar resistencias de 300 000 psi, así como rigideces de 50×10^6 psi. Los materiales compuestos carbono-carbono se han utilizado como conos de nariz y bordes de ataque de vehículos aeroespaciales de alto rendimiento, como el transbordador espacial, así como en discos de freno de automóviles de carreras y aeronaves comerciales de retropropulsión.

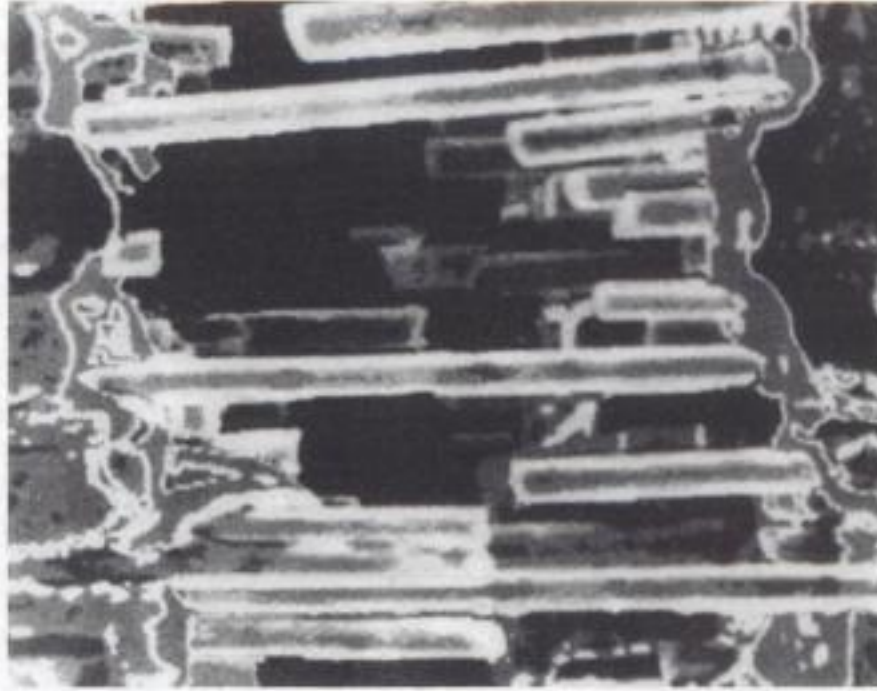
Los materiales compuestos de fibras cerámicas en matriz cerámica logran una resistencia y tenacidad a la fractura mejoradas, en comparación con materiales cerámicos convencionales (tabla 16-4). Los refuerzos de fibra mejoran la tenacidad de la matriz cerámica de varias formas. Primero, una grieta que se mueva a través de la matriz encuentra una fibra: si la unión entre matriz y fibra es mala, la grieta se ve obligada a seguir alrededor de la fibra para continuar el proceso de fractura. Además, una mala unión permite que la fibra empiece a salirse de la matriz [Fig. 16-29(a)]. Ambos procesos consumen energía, aumentando así la tenacidad a la fractura. Finalmente, conforme se inicia una grieta en la matriz, algunas fibras que no estén rotas pueden servir de puente en la grieta, aportando un esfuerzo a la compresión que ayuda a que la grieta no se abra [Fig. 16-29(b)].

TABLA 16-4 ■ Efecto de las fibras de refuerzo de SiC sobre las propiedades de materiales cerámicos seleccionados

Material	Resistencia a la flexión (psi)	Tenacidad a la fractura (psi $\sqrt{\text{pulg}}$)
Al_2O_3	80 000	5 000
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$	115 000	8 000
SiC	72 000	4 000
SiC/SiC	110 000	23 000
ZrO_2	30 000	5 000
ZrO_2/SiC	65 000	20 200
Si_3N_4	68 000	4 000
$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$	115 000	51 000
Vidrio	9 000	1 000
Vidrio-SiC	120 000	17 000
Cerámica vítrea	30 000	2 000
Cerámica vítrea/SiC	120 000	16 000



(a)



(b)

Figura 16-29 Dos modos de falla en los materiales compuestos cerámica-cerámica: (a) Una excesiva extracción de las fibras de SiC en una matriz de vidrio logra una buena tenacidad para el material compuesto (20 $\times$). [De *Metals Handbook*, American Society for Metals, vol. 9, 9a. ed., 1985.] (b) Puentes de algunas fibras a través de una grieta, que mejoran la tenacidad de un material compuesto de matriz cerámica (ampliación desconocida). [De *Journal of Metals*, mayo de 1991.]

La fracción volumétrica de epoxi que resta es 0.817. Una superficie 0.817 veces la sección transversal del puntal debe soportar una carga de 500 lb sin no más de 12 000 psi, en caso de que fallaran todas las fibras:

$$A_{\text{epoxi}} = 0.817 A_{\text{total}} = \frac{F}{\sigma} = \frac{500 \text{ lb}}{12\,000 \text{ psi}} = 0.0416 \text{ pulg}^2$$

$$A_{\text{total}} = \frac{0.0416}{0.817} = 0.051 \text{ pulg}^2 \text{ o bien } d = 0.255 \text{ pulg}$$

$$\text{Volumen}_{\text{puntal}} = A_{\text{total}} = (0.051 \text{ pulg}^2)(120 \text{ pulg}) = 6.12 \text{ pulg}^3$$

$$\begin{aligned} \text{Peso}_{\text{puntal}} &= \rho V = [(0.0686)(0.183) + (0.0451)(0.817)](6.12) \\ &= 0.302 \text{ lb} \end{aligned}$$

$$\text{Porcentaje en peso de carbono} = \frac{(0.183)(1.9 \text{ g/cm}^3)}{(0.183)(1.9) + (0.817)(1.25)} = 0.254$$

$$\text{Peso de carbono} = (0.254)(0.302 \text{ lb}) = 0.077$$

$$\text{Peso de resina epóxica} = (0.746)(0.302 \text{ lb}) = 0.225$$

$$\text{Costo de cada puntal} = (0.077)(\$30) + (0.225)(\$0.80) = \$2.49$$

El puntal reforzado con fibras de carbono tiene menos de una cuarta parte del diámetro de una estructura sólo de resina epóxica, con sólo el 5% del peso y la mitad del costo.

También podríamos repetir estos cálculos usando fibras de Kevlar™, que tienen un módulo de 18×10^6 psi, una densidad de $1.44 \text{ g/cm}^3 = 0.052 \text{ lb/pulg}^3$ y un costo de aproximadamente \$20/lb. Si lo hacemos, encontraremos que se necesita una fracción volumétrica de 0.8 fibras. Tenga en cuenta que 0.8 es la máxima fracción volumétrica que se puede incorporar en una matriz. También encontraríamos que el diámetro requerido del puntal sería de 0.515 pulg y que pesa 1.263 lb, con un costo de \$20.94. El módulo del Kevlar™ no es lo suficientemente alto para compensar su alto costo.

A pesar de que las fibras de carbono son las más costosas, permiten la fabricación del puntal más ligero y el de menor costo de materiales. (Sin embargo, este cálculo no toma en consideración el costo de fabricación de la pieza.) Nuestro diseño, por lo tanto, es usar un puntal de 0.255 pulg de diámetro con una fracción volumétrica de 0.183 de **fibras de carbono de alto módulo**.

16-7

Materiales compuestos laminares

Los materiales compuestos laminares comprenden recubrimientos muy delgados, superficies protectoras más gruesas, revestimientos, materiales bimetálicos, laminados y todo un conjunto de otras aplicaciones. Además, también podemos considerar como parcialmente laminares los materiales compuestos reforzados con fibra producidos en forma de cintas o de tejidos. Muchos de ellos están diseñados para mejorar la resistencia a la corrosión, a la vez que mantienen un bajo costo, una elevada resistencia o un peso ligero. Otras características importantes son una resistencia superior al desgaste o a la abrasión, una mejor apariencia y una expansión térmica fuera de lo común.

Regla de las mezclas Algunas de las propiedades de los materiales compuestos laminares paralelas a las laminillas se estiman a partir de la regla de las mezclas. La densidad, las

conductividades eléctrica y térmica, así como los módulos de elasticidad en dirección paralela a las laminillas se pueden calcular con un error despreciable utilizando la fórmula siguiente:

$$\text{Densidad} = \rho_{c,\parallel} = \sum (f_i \rho_i) \quad (16-13)$$

$$\text{Conductividad eléctrica} = \sigma_{c,\parallel} = \sum (f_i \sigma_i)$$

$$\text{Conductividad térmica} = K_{c,\parallel} = \sum (f_i K_i) \quad (16-14)$$

$$\text{Módulo de elasticidad} = E_{c,\parallel} = \sum (f_i E_i)$$

Los materiales compuestos laminares son altamente anisotrópicos. Las propiedades en dirección perpendicular a las laminillas son:

$$\text{Conductividad eléctrica} = \frac{1}{\sigma_{c,\perp}} = \sum \left(\frac{f_i}{\sigma_i} \right)$$

$$\text{Conductividad térmica} = \frac{1}{K_{c,\perp}} = \sum \left(\frac{f_i}{K_i} \right) \quad (16-15)$$

$$\text{Módulo de elasticidad} = \frac{1}{E_{c,\perp}} = \sum \left(\frac{f_i}{E_i} \right)$$

Sin embargo, gran parte de las propiedades verdaderamente importantes, como las resistencias a la corrosión y al desgaste, dependen principalmente de sólo uno de los componentes del material compuesto, por lo que la regla de las mezclas no es aplicable.

Producción de compuestos laminares Para producir materiales compuestos laminares se usan varios métodos, incluyendo una diversidad de técnicas de deformación y de unión que se utilizan principalmente para los metales (Fig. 16-30).

Con frecuencia, cada una de las capas se une a las adyacentes mediante una *unión adhesiva*, como en la fabricación del triplay o madera contrachapada. Los materiales compuestos de matriz polimérica hechos a partir de varias capas de prepreps de tejido o de cinta también se cementan usando adhesivos; se coloca una película delgada de material no polimerizado entre cada capa de prepreg. Cuando estas capas se aprietan unas con otras a temperaturas elevadas, se completa la polimerización, y las fibras del prepreg quedan unidas para producir materiales compuestos que llegan a tener docenas de capas de espesor.

La mayoría de los materiales compuestos laminares metálicos, como los recubrimientos y los bimetálicos, se producen por *unión por deformación*, como laminación en caliente o en

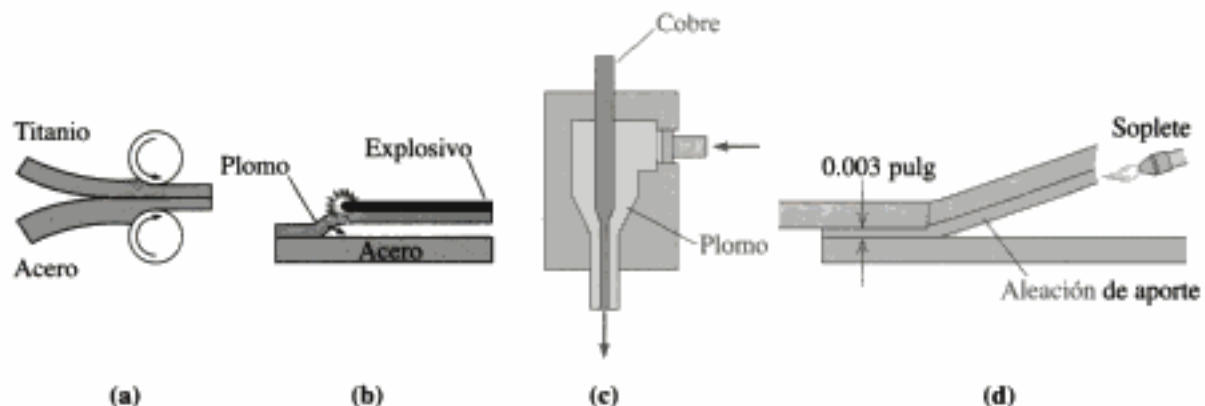


Figura 16-30 Técnicas para producir materiales compuestos laminares: (a) unión por laminación, (b) unión por explosión, (c) coextrusión y (d) soldadura con aporte.

Metales revestidos Son materiales compuestos metal con metal. Un ejemplo común del **revestimiento** son las monedas plateadas de Estados Unidos. Una aleación de Cu-80% Ni se une en ambas caras de una aleación Cu-20% Ni. La relación de espesores es de aproximadamente 1/6:2/3:1/6. La aleación de alto nivel de níquel tiene un color plateado, en tanto que el núcleo, donde predomina el cobre, tiene un bajo costo.

Los materiales revestidos proporcionan una combinación de buena resistencia a la corrosión con alta resistencia. El *Alclad* es un material compuesto revestido en el cual se une aluminio comercialmente puro con aleaciones de aluminio de una más alta resistencia. El aluminio puro protege contra la corrosión a la aleación de mayor resistencia. El espesor de la capa de aluminio puro es de entre 1% y 15% del espesor total. El *Alclad* se utiliza en la construcción de aeronaves, intercambiadores de calor, elementos de construcción de edificios y depósitos de almacenamiento, donde se desee tener una buena combinación de resistencia, resistencia a la corrosión y bajo peso.

Bimetálicos Los indicadores y controladores de temperatura aprovechan los diferentes coeficientes de expansión térmica de dos metales distintos en un material compuesto laminar. Si se calientan las dos piezas de metal, el metal que tenga un coeficiente de expansión térmica más elevado se alargará más. Si ambas piezas están rígidamente unidas entre sí, la diferencia de sus coeficientes hará que la tira metálica se tuerza produciendo una superficie curva. La cantidad de movimiento depende de la temperatura. Midiendo la curvatura o la deflexión de la tira, podemos determinar dicha temperatura. De igual forma, si el extremo libre de la tira activa un relevador, ésta puede servir para conectar o desconectar un calentador o un equipo de aire acondicionado, a fin de regular la temperatura. Los metales que se seleccionan para los **bimetálicos** deben tener a) coeficientes de expansión térmica muy distintos, b) características de expansión reversibles y repetibles y c) un alto módulo de elasticidad, para poder operar. Frecuentemente, la tira de baja expansión se hace con *invar*, una aleación de hierro-níquel, en tanto que la tira de alta expansión puede fabricarse de latón, metal Monel, o níquel puro.

Los bimetálicos pueden actuar como cortacircuitos, así como termostatos; si la corriente que pasa a través de la tira es demasiado elevada, el calentamiento hará que se flexione el bimetálico abriendo el circuito.

Capacitores multicapa Para la fabricación de miles de millones de capacitores multicapa, se utiliza una geometría similar. Su estructura está formada por hojas muy delgadas de material cerámico basado en el BaTiO_3 separadas por electrodos Ag-Pd o Ni (capítulo 18).

16-9

Estructuras tipo emparedado

Los materiales tipo **emparedado** tienen capas delgadas de un material de recubrimiento unido a un material de relleno ligero, como una espuma de polímero. Ni el relleno ni el material de recubrimiento son materiales rígidos o resistentes, pero el material compuesto sí tiene ambas propiedades. Un ejemplo familiar es el cartón corrugado. Un núcleo corrugado de papel se une por ambos lados a un papel liso y grueso. Ni el núcleo corrugado ni el papel de recubrimiento son rígidos, pero la combinación sí lo es.

Otro ejemplo importante es la estructura en panal utilizada en aplicaciones aeronavales. Se produce un **panal** pegando una tira delgada de aluminio en lugares seleccionados. El material del panal se expande después para producir un panel celular de muy baja densidad que, tal cual, es inestable (Fig. 16-32). Sin embargo, si a ambos lados del panal se le adhieren hojas de aluminio, se obtiene un emparedado excepcionalmente ligero, muy rígido y fuerte, con una densidad de hasta 0.04 g/cm^3 .

Las celdas del panal tienen una diversidad de formas hexagonales, cuadradas, rectangulares o senoidales y se pueden fabricar de aluminio, fibra de vidrio, papel, polímeros de aramidas

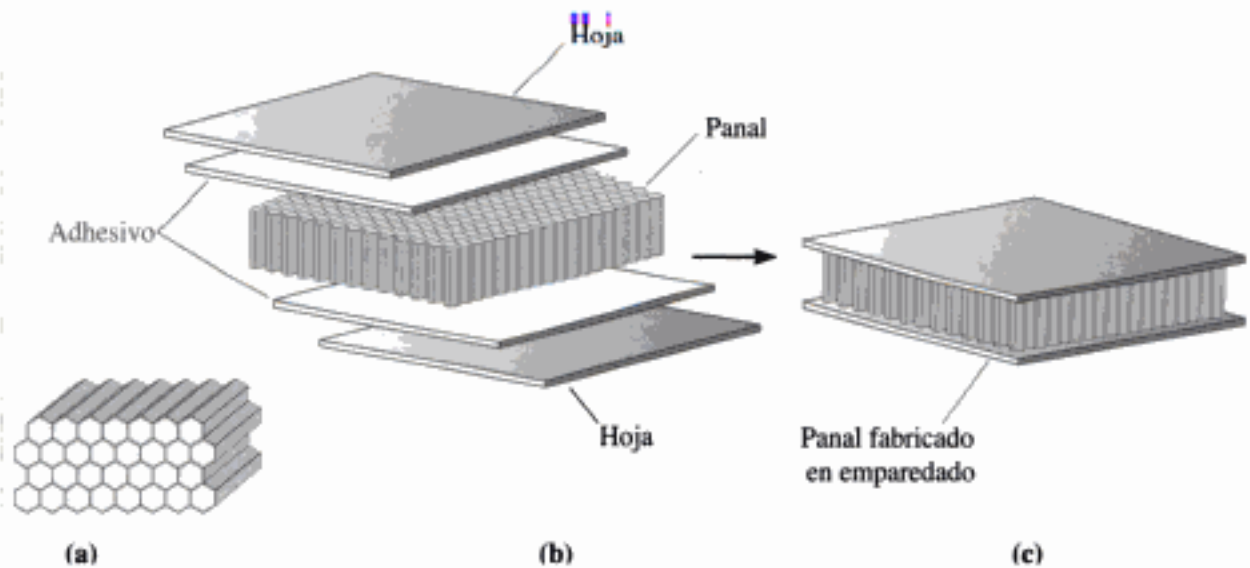


Figura 16-32 (a) Núcleo en forma de panel de celdas hexagonales, (b) que se pueden unir a dos hojas mediante capas de adhesivo y que (c) producen una estructura en forma de emparedado excepcionalmente ligera, aunque rígida y fuerte.

y otros materiales. Las celdas del panel se pueden rellenar con espuma o fibra de vidrio para lograr una excelente absorción de sonidos y vibraciones. La figura 16-33 describe un método con el que se puede fabricar el panel.

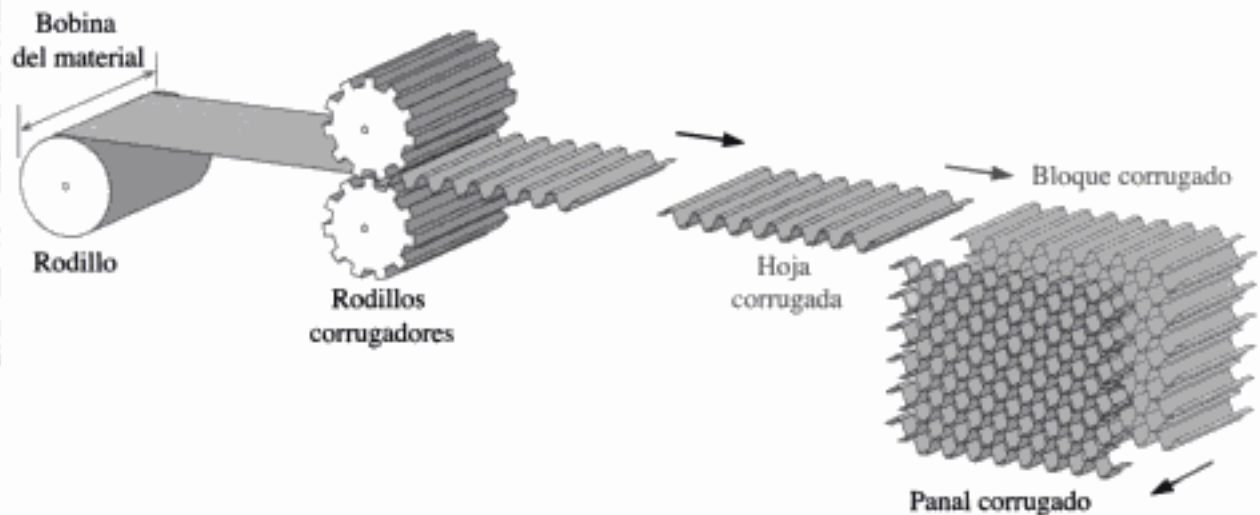


Figura 16-33 En el método por corrugación para producir un núcleo en panel, el material (como el aluminio) se corruga entre dos rodillos. Las hojas corrugadas se unen entre sí con un adhesivo y después se cortan al espesor deseado.

RESUMEN

➤ Los materiales compuestos están formados de dos o más materiales o fases unidas o conectadas para obtener una combinación de propiedades que no se podrían lograr de otra manera. Para la determinación de las propiedades es muy importante la fracción volumétrica y la conectividad de fases o de materiales en un material compuesto, así como la naturaleza de la interfaz entre la fase dispersa y la matriz.

INNOVACIÓN ADICIONAL

1. MEYERS, M. A. y K. K. CHAWLA. *Mechanical Behavior of Materials*, Prentice Hall, 1998.
2. HARPER, C. A. *Handbook of Materials Product Design*, 3a. ed., McGraw Hill, 2001.
3. FROES, F. H. "Materials for Sports", *MRS Bulletin*, 23(3), 1998.
4. LOY, D. A. "Hybrid Organic-Inorganic Materials", *MRS Bulletin*, 26(5), 2001, p. 364.
5. VAIA, R. A. y E. P. GIANNELIS. "Polymer Nanocomposites: Status and Opportunities", *MRS Bulletin*, 26(5), 2001, p. 394.
6. ARKLES, B. "Commercial Applications of Sol-Gel Derived Hybrid Materials", *MRS Bulletin*, 26(5), 2001, p. 402.
7. PHULE, P. P. y T. WOOD. "Sol-Gel Processing of Ceramics", *Encyclopedia of Advanced Materials*, M. FLEMINGS, Ed., Pergamon, 2001.
8. ARCH, P. *Nova Chemicals, Technical discussions and assistance are acknowledged*, 2002.
9. SAMPATH, S. y MCCUNE, R. "Thermal Spray Processing of Materials", *MRS Bulletin*, vol. 25, No. 7, 2000, p. 12.
10. GREENBERG. *Personal communication*, 2002.
11. NEWNHAM, R. E. "Nonmechanical Properties of Composites", en *Concise Encyclopedia of Composite Materials*, A. Kelly, Ed., Pergamon Press, Oxford, 1989, pp. 205-211.
12. ROSATO, D., D. DiMATTIA y D. ROSATO. *Designing with Plastics and Composites*, New York, Van Nostrand Reinhold, 1991.
13. STRONG, B. A. *Plastics-Materials and Processing*, 2a. ed., Prentice Hall, 2000.



PROBLEMAS

Sección 16-1 Materiales compuestos endurecidos por dispersión

- 16-1 ¿Qué es un material compuesto?
- 16-2 ¿De qué dependen las propiedades de los materiales compuestos?
- 16-3 Dé ejemplos de aplicaciones donde los materiales compuestos se usan para soportar cargas.
- 16-4 Dé dos ejemplos de aplicaciones donde los materiales compuestos se usan para aplicaciones no estructurales.
- 16-5 ¿Qué es un material compuesto endurecido por dispersión? ¿En qué se diferencia de un material compuesto reforzado con partículas?
- 16-6 ¿Qué es un material nanocompuesto? ¿Cómo es posible describir como materiales compuestos a los aceros que contengan ferrita y martensita?
- 16-7 Níquel con 2% en peso de torio se prepara en polvo, se consolida formando una pieza y se sinteriza en presencia de oxígeno, para que todo el torio genere esferas de ThO_2 de 80 nm de diámetro. Calcule el número de esferas por cm^3 . La densidad del ThO_2 es de 9.86 g/cm^3 .
- 16-8 Para crear una capa delgada de óxido, se trata un polvo de aluminio esférico (SAP) de 0.002 mm de diámetro que después se utiliza para producir un material SAP endurecido por dispersión con un 10% volumétrico de Al_2O_3 . Calcule el espesor promedio de la película de óxido antes de la compactación y sinterizado de los polvos de la pieza.
- 16-9 Mediante oxidación interna, se introducen en el tungsteno partículas de itria (Y_2O_3) de 750 Å de diámetro. Mediciones hechas utilizando un microscopio electrónico muestran que hay 5×10^{14} partículas de óxido por cm^3 . Calcule el porcentaje en peso del Y que existía originalmente en la aleación. La densidad del Y_2O_3 es de 5.01 g/cm^3 .
- 16-10 Sin tratamiento en especial, se encuentra que el aluminio tiene comúnmente una capa de Al_2O_3 de 3 nm de espesor. Si el polvo de aluminio esférico preparado con un diámetro total de 0.01 mm se utiliza para producir el material SAP endurecido por dispersión, calcule el porcentaje volumétrico de Al_2O_3 en el material y en la cantidad de partículas de óxido por cm^3 . Suponga que el óxido se rompe en escamas en forma de disco de 3 nm de espesor y $3 \times 10^{-4} \text{ mm}$ de diámetro. Compare el número de partículas de óxido por cm^3 con el de los

átomos de solución sólida por cm^3 cuando al aluminio se le agrega un 3% en peso de un elemento de aleación.

Sección 16-2 Materiales compuestos particulados

- 16-11 ¿Qué es un material compuesto particulado?
- 16-12 ¿Qué es un cermet? ¿Cuál es el papel del WC y del Co en un cermet?
- 16-13 Calcule la densidad de un carburo cementado, es decir de un cermet, con base en una matriz de titanio, si el material compuesto contiene 50% en peso de WC, 22% en peso de TaC y 14% en peso de TiC. (Véase el ejemplo 16-2 para obtener las densidades de los carburos.)
- 16-14 Una piedra de esmeril común tiene 9 pulg de diámetro, 1 pulg de espesor y pesa 6 lb. La piedra contiene SiC (de densidad 3.2 g/cm^3) unido por vidrio de sílice (densidad 2.5 g/cm^3); la porosidad volumétrica de la piedra es de 5%. El SiC está en forma de cubos de 0.04 cm por lado. Calcule
- la fracción volumétrica de partículas de SiC en la piedra y
 - la cantidad de partículas de SiC que se han perdido de la rueda cuando ésta se ha desgastado a un diámetro de 8 pulg.
- 16-15 Se produce material para un receptáculo eléctrico infiltrando cobre en un compacto poroso de carburo de tungsteno (WC). La densidad del material compuesto final es 12.3 g/cm^3 . Suponiendo que se llenan con cobre todos los poros, calcule
- la fracción de volumen de cobre en el material compuesto
 - la fracción volumétrica de poros en el material compacto de WC antes de la infiltración y
 - la densidad original del compacto de WC antes de la infiltración.
- 16-16 Se produce un material para receptáculos eléctricos elaborando primero una pieza compacta de tungsteno poroso que pesa 125 g. Se introduce en el compacto plata líquida; una medición cuidadosa indica que se han infiltrado 105 g de plata. La densidad final del material compuesto es de 13.8 g/cm^3 . Calcule la fracción volumétrica del material compacto original que corresponde a porosidad interconectada, así como la fracción volumétrica de la porosidad cerrada (sin infiltración de plata).
- 16-17 ¿Cuánta arcilla deberá agregarse a 10 kg de polietileno para producir un material compuesto de bajo costo con un módulo de elasticidad superior a 120 000 psi y con una resistencia a la tensión mayor de 2 000 psi? La densidad de la arcilla es de 2.4 g/cm^3 y la del polietileno de 0.92 g/cm^3 .
- 16-18 Desearíamos producir un componente de resina epóxica ligero para proporcionar aislamiento térmico. Tenemos disponibles cuentas o esferas huecas de vidrio con un diámetro exterior de 1/16 de pulg y con paredes

de un espesor de 0.001 pulg. Determine el peso y el número de cuentas que deben agregarse a la resina epóxica para producir un material compuesto de una libra con una densidad de 0.65 g/cm^3 . La densidad del vidrio es de 2.5 g/cm^3 y la del epoxi de 1.25 g/cm^3 .

Sección 16-4 Características de los materiales compuestos reforzados con fibras

- 16-19 ¿Qué es un material compuesto reforzado con fibras?
- 16-20 ¿Qué materiales para refuerzo con fibras son de uso común?
- 16-21 En un material compuesto reforzado por fibras, ¿cuál es el papel de la matriz?
- 16-22 ¿Qué significan los términos CFRP y GFRP?
- 16-23 Explique brevemente cómo afectan los volúmenes de fibra, orientación y resistencia de la misma, así como su módulo las propiedades de los materiales compuestos reforzados con fibras.
- 16-24 En 8 kg de una matriz de aluminio se introducen con una orientación unidireccional 5 kg de fibras de boro continuas. Calcule
- la densidad del compuesto,
 - el módulo de elasticidad en dirección paralela a las fibras y
 - el módulo de elasticidad en dirección perpendicular a las fibras.
- 16-25 Deseamos producir 10 lb de un material compuesto reforzado con fibras unidireccionales de carbono HS en una matriz poliimida que tiene un módulo de elasticidad de por lo menos $25 \times 10^6 \text{ psi}$ en dirección paralela a las fibras. ¿Cuántas libras de fibras se necesitan? Para resolver el problema, véase el capítulo 15 para las propiedades de la poliimida.
- 16-26 Producimos un material compuesto continuo reforzado unidireccionalmente que contiene 60% en volumen de fibras de carbono HM en una matriz de epoxi. El epoxi tiene una resistencia a la tensión de 15 000 psi. ¿Cuál es la fracción de la fuerza aplicada que soportan las fibras?
- 16-27 Una matriz de poliéster con una resistencia a la tensión de 13 000 psi se refuerza mediante fibras de Al_2O_3 . ¿Cuál es el porcentaje volumétrico de fibras que se han de agregar para asegurar que las fibras soportan 75% de la carga aplicada?
- 16-28 Una matriz de resina epóxica se refuerza utilizando 40% volumétrico de fibras de vidrio E a fin de producir un material compuesto de 2 cm de diámetro que debe soportar una carga de 25 000 N. Calcule el esfuerzo aplicado a cada fibra.
- 16-29 Para fabricar una pieza de 1 000 lb para un vehículo espacial tripulado, se utiliza una aleación de titanio con un módulo de elasticidad de $16 \times 10^6 \text{ psi}$. Determine el peso de una pieza que tenga el mismo módulo de elasticidad en dirección paralela a las fibras, si la pieza se fabrica de

principal para el uso de estos materiales compuestos en estas aplicaciones?

- 16-41 Una matriz de poliimida ha de ser reforzada con 70% en volumen de fibras de carbono para obtener un módulo de elasticidad mínimo de 40×10^6 psi. Recomiende un proceso para la producción de las fibras de carbono requeridas. Estime la resistencia a la tensión de estas fibras.
- 16-42 ¿Cuáles son las ventajas de utilizar materiales compuestos de matriz cerámica?

Sección 16-7 Materiales compuestos laminares

Sección 16-8 Ejemplos y aplicaciones de materiales compuestos laminares

Sección 16-9 Estructuras tipo emparedado

- 16-43 ¿Qué es un material compuesto laminar?
- 16-44 Un microlaminado, el Arall, se produce utilizando cinco hojas de aluminio de 0.4 mm de espesor y cuatro hojas de epoxi de 0.2 mm de espesor reforzado con fibras de Kevlar™ alineadas unidireccionalmente. La fracción volumétrica de las fibras de Kevlar™ en estas hojas intermedias es de 55%. Calcule el módulo de elasticidad del microlaminado en direcciones paralela y perpendicular a las fibras de Kevlar™ alineadas unidireccionalmente. ¿Cuáles son las ventajas principales del material Arall en comparación con las del aluminio sin reforzar?
- 16-45 Como material aislante, se produce un laminado compuesto de aluminio de 0.1 mm de espesor emparedado alrededor de una capa de 2 cm de espesor de espuma de poliestireno. Calcule la conductividad térmica del laminado en direcciones paralela y perpendicular a las capas. La conductividad térmica del aluminio es de $0.57 \frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K}}$ y la de la espuma es de $0.000077 \frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K}}$.
- 16-46 Una hoja de 0.01 cm de espesor de un polímero con un módulo de elasticidad de 0.7×10^6 psi está emparedado entre dos hojas de vidrio de 4 mm de espesor con un módulo de elasticidad de 12×10^6 psi. Calcule el módulo de elasticidad del material compuesto en direcciones paralela y perpendicular a las hojas.
- 16-47 Una moneda estadounidense de 25 centavos tiene un diámetro de $\frac{15}{16}$ de pulg y aproximadamente $\frac{1}{16}$ de pulg de espesor. El cobre cuesta aproximadamente \$1.10 por libra y el níquel cerca de \$4.10 por libra. Compare el costo del material en una moneda de material compuesto con una moneda fabricada totalmente de níquel.
- 16-48 Calcule la densidad de una estructura en panel formada por los elementos siguientes: las dos hojas de cierre de 2 mm de espesor se fabrican utilizando un prepreg

de matriz epóxica con un 55% en volumen de fibras de vidrio E. El panel de aluminio tiene un ancho de 2 cm; las celdas tienen forma de cuadrados de 0.5 cm de lado y sus paredes tienen un espesor de 0.1 mm. Estime la densidad de la estructura. Compare el peso de un panel de 1 m $\times$ 2 m de este panel con un panel hecho de aluminio sólido de las mismas dimensiones.



Problemas de diseño

- 16-49 Diseñe los materiales y el procesamiento requeridos para producir un material compuesto de fibra de vidrio reforzado con fibras discontinuas pero alineadas que servirá como cofre de un automóvil deportivo. El material compuesto debe lograr una densidad de menos de 1.6 g/cm^3 y una resistencia de 20 000 psi. Asegúrese de elaborar una lista de todas las hipótesis que usted haga para la creación de su diseño.
- 16-50 Se debe diseñar un depósito esférico de tres pies de diámetro interior para contener cloro líquido. El depósito requiere un módulo de elasticidad de por lo menos 15×10^6 psi en la dirección tangencial, con una conductividad térmica en la dirección radial de no más de $0.006 \text{ cal/cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ y no deberá pesar más de 170 lb. Utilizando únicamente la lista de materiales de la tabla 21-3, diseñe un material y un espesor del depósito que resulten adecuados. Estime el costo de los materiales de su depósito, a fin de asegurarse de que no resulta prohibitivo.
- 16-51 Diseñe un material para receptáculos eléctricos, así como un método para su producción que resulte en una densidad no superior a 6 g/cm^3 , y que, sin embargo, por lo menos 50% en volumen del mismo sea conductor.
- 16-52 ¿Qué factores deberán considerarse para el diseño de un cuadro para bicicleta, utilizando aluminio y un material compuesto C-C?



Problema en computadora

- 16-53 *Propiedades de materiales compuestos laminares.* Escriba un programa de computadora (o utilice una hoja de cálculo) para calcular las propiedades de un material compuesto laminar utilizando la regla de las mezclas. Por ejemplo, si el usuario proporciona el valor de la conductividad térmica de cada fase y la fracción volumétrica correspondiente, el programa debe dar el valor de la conductividad térmica efectiva. Deberán calcularse las propiedades en direcciones paralela y perpendicular a las laminillas.

By Arkanosant...

Capítulo



Los materiales para la construcción, como los aceros, el concreto, la madera y los vidrios, junto con los materiales compuestos, tales como la fibra de vidrio, desempeñan un importante papel en el desarrollo y mantenimiento de la infraestructura de una nación. Aunque muchos de nuestros materiales para la construcción actuales están bien desarrollados y las técnicas para su producción han llegado a la madurez, se pueden observar varias nuevas vertientes en los materiales para la construcción. El uso de sensores y accionadores inteligentes que pueden ayudar a controlar las estructuras o vigilar la salud de las mismas es una de las vertientes. El creciente uso de los materiales compuestos y de los adhesivos poliméricos es otra dimensión adicional que se ha desarrollado de forma considerable. Los procesos como los de soldadura y galvanizado, así como los fenómenos como la corrosión desempeñan papeles importantes en la confiabilidad y en la durabilidad de las estructuras. (Cortesía de PhotoDisc/Getty Images.)

Copyrighted material

Materiales para la construcción

¿Alguna vez se preguntó...

- ...cuáles son los materiales para la construcción de uso más extendido?
- ...cuál es la diferencia entre el cemento y el concreto?
- ...cuál de los materiales para la construcción es un material compuesto existente en la naturaleza?
- ...qué es el concreto reforzado?

En la construcción de edificios, supercarreteras, puentes y gran parte de la infraestructura del país, se utilizan varios materiales de importancia. En este capítulo veremos tres de los más importantes de entre estos materiales: la madera, el concreto y el asfalto. El campo de los materiales para la construcción es verdaderamente muy importante para los ingenieros, especialmente para los ingenieros civiles, incluyendo los invo-

lucrados en carreteras y puentes. Las propiedades y el procesamiento de los aceros utilizados para la elaboración del concreto reforzado, los materiales cerámicos (por ejemplo, la arena, la cal y el concreto), los plásticos (por ejemplo, los epoxis y las espumas de poliestireno), los vidrios y los materiales compuestos (por ejemplo, la fibra de vidrio) representan un muy importante papel en el desarrollo y uso de los materiales para la

construcción. Otra área en la ingeniería civil cuya importancia es cada vez mayor está relacionada con el uso de sensores y de accionadores en edificios y puentes. Aquí desempeñan un papel sobresaliente los materiales avanzados desarrollados para aplicaciones microelectrónicas y ópticas.

Por ejemplo, actualmente se están desarrollando puentes y edificios inteligentes que usan sensores de fibra óptica.[1] Estos sensores pueden vigilar la salud de las estructuras de manera continua, pudiendo así emitir avisos prematuros sobre cualquier problema potencial. De manera similar, los investigadores del área de las estructuras inteligentes también están trabajando en muchas otras ideas utilizando sensores que pueden detectar fenómenos como la acumulación de hielo. Si se detecta hielo, el sistema puede poner en marcha un rociado de agua salada para impedir o retrasar la congelación. Existen también aplicaciones de materiales avanzados que detectan la nieve o el hielo. Estos materiales se utilizan en rampas para cocheras muy inclinadas en estacionamientos comerciales donde al activarse el sensor de nieve-hielo se inicia la calefacción de esa sección de la rampa.[2] Igualmente, ya contamos ahora con muchos recubrimientos in-

teligentes para vidrios que pueden reflejar el calor y hacer que los edificios sean eficientes en el uso de la energía. También existen nuevos recubrimientos que resultan en vidrios que se limpian por sí solos.[3,4] También se están implementando nuevas tecnologías para desarrollar "edificios ecológicos".

Existen muchas otras áreas de materiales que se relacionan con las estructuras. Por ejemplo, en cualquier país es un costo de primer orden la corrosión de los puentes y las limitaciones que ésta impone sobre la vida útil esperada del puente. Las estrategias que utilizan aceros galvanizados y las pinturas apropiadas para la protección contra la corrosión desempeñan ahora un importantísimo papel en el desarrollo. De manera similar, muchas técnicas de unión de materiales, como la soldadura, tienen también una función preponderante en la construcción de puentes y edificios. Debe tomarse en consideración los impactos ambientales a largo plazo de los materiales utilizados. Por ejemplo, ¿cuáles son los mejores materiales para utilizarse en tuberías de agua, en aislamientos, en retardantes de fuego, etcétera? El objetivo de este capítulo es presentar un resumen de las propiedades de la madera, del concreto y del asfalto.

17-1

Estructura de la madera

La madera, un material compuesto de origen natural, es uno de nuestros materiales más comunes. A pesar de que no se trata de un material de "alta tecnología", estamos literalmente rodeados por madera en nuestros hogares y la valoramos en función de su belleza. Además, es un material resistente y ligero que sigue predominando en gran parte de la industria de la construcción.

La madera puede considerarse como un material compuesto complejo reforzado con fibras y formado de celdas poliméricas largas, tubulares y alineadas unidireccionalmente dentro de una matriz polimérica. Además, los tubos poliméricos están formados por paquetes de fibras de celulosa parcialmente cristalina, alineada en varias direcciones en relación con el eje de los tubos. Esta disposición obtiene excelentes propiedades a la tensión en la dirección longitudinal.

La madera está formada por cuatro constituyentes principales. Las fibras de **celulosa** representan aproximadamente de 40 a 50% de la madera. La celulosa es un polímero termoplástico de origen natural con un grado de polimerización de aproximadamente 10 000. En la figura 17-1 se muestra la estructura de la celulosa. Aproximadamente de 25 a 35% de un árbol es **hemicelulosa**, un polímero con un grado de polimerización de alrededor de 200. Otro 20 a 30% de un árbol es la **lignina**, un cemento orgánico de bajo peso molecular que une los diversos constituyentes de la madera. Finalmente, los **extractivos** son impurezas orgánicas como aceites que le dan color a la madera o que actúan como preservadores contra el entorno y los insectos, así como los minerales inorgánicos como el sílice, que es un factor que desafilas las hojas de las sierras durante el corte de la madera. Los extractivos pueden representar hasta 10% del total de la madera.

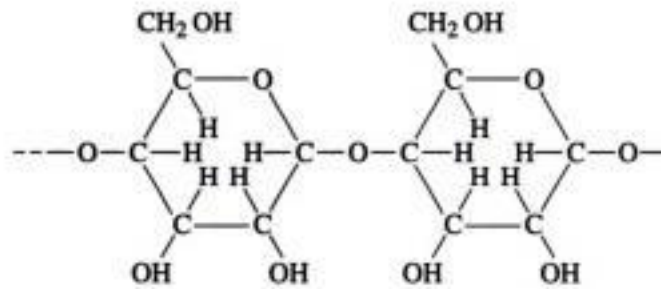


Figura 17-1
Estructura de los filamentos de celulosa en la madera.

Existen tres niveles importantes en la estructura de la madera: la estructura fibrosa, la estructura de celdas y la macroestructura (Fig. 17-2).

Estructura fibrosa El componente básico de la madera es la celulosa, $C_6H_{10}O_5$, organizada en cadenas poliméricas formando largas filas. Gran parte de la longitud de las fibras es cristalina, con las regiones cristalinas separadas por pequeños tramos de celulosa. Un paquete de cadenas de celulosa está recubierta por una capa de cadenas de hemicelulosa amorfa, con cadenas aleatoriamente orientadas. Finalmente, la hemicelulosa está cubierta de lignina. Todo el conjunto, formado por las cadenas de celulosa, las cadenas de hemicelulosa y la lignina se conoce como **microfibrilla**; ésta puede alcanzar una longitud virtualmente infinita.

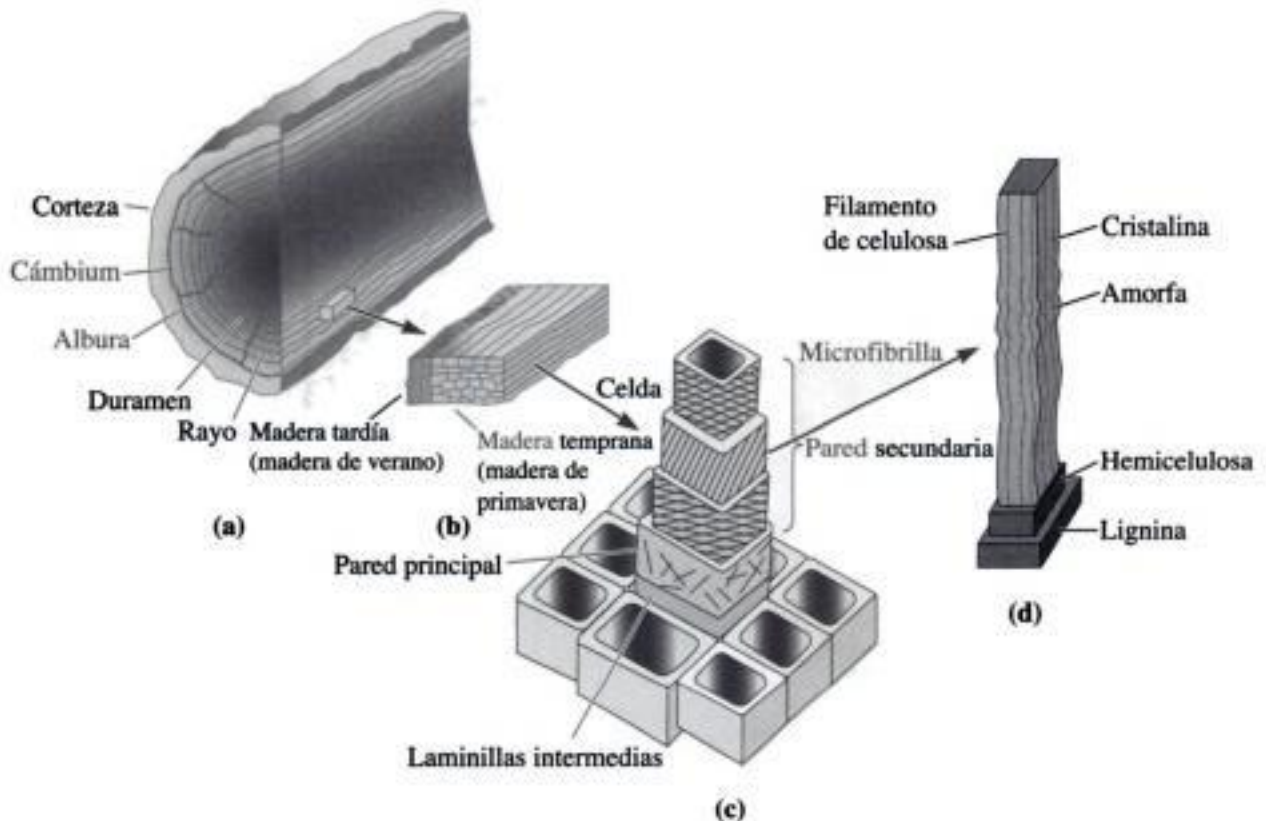
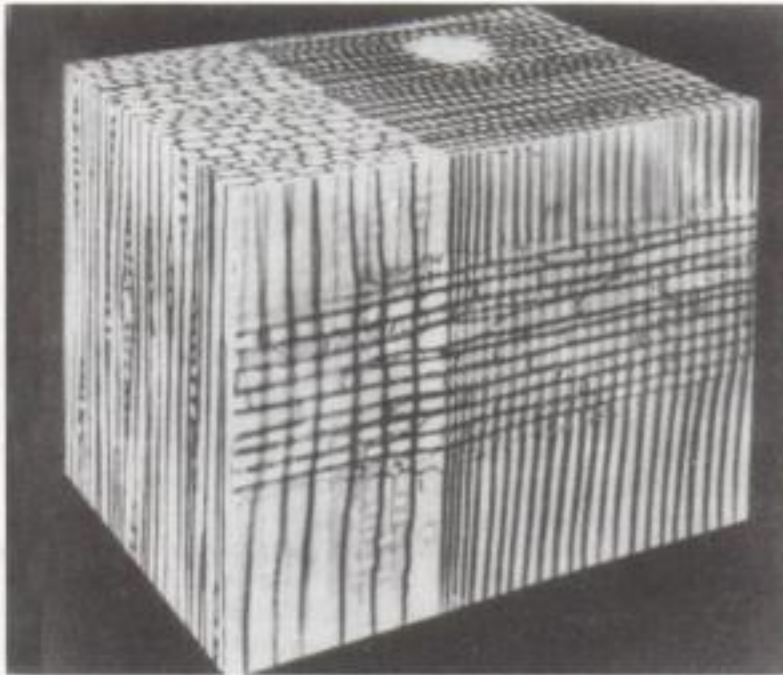
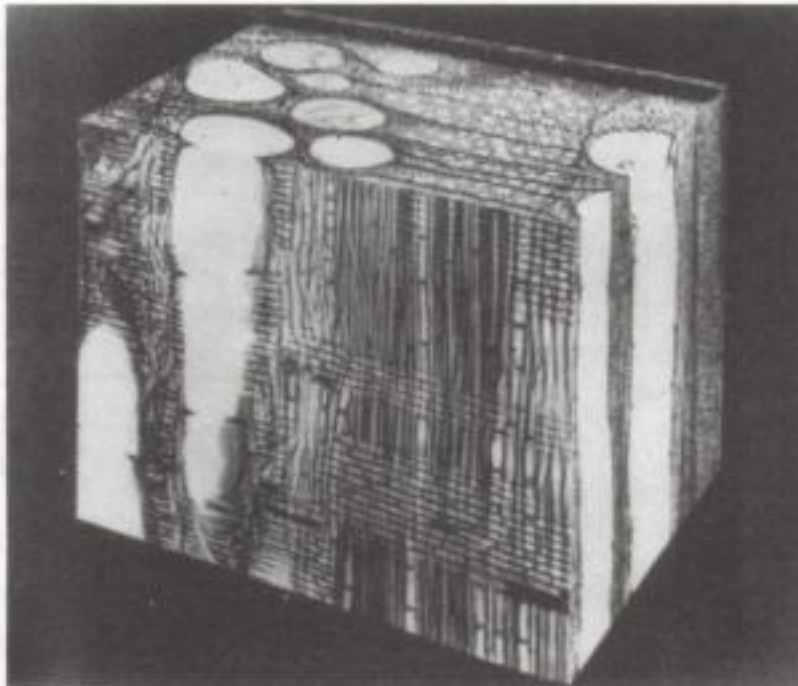


Figura 17-2 Estructura de la madera: (a) macroestructura, que incluye una estructura en capas "bordeada" por anillos de crecimiento anual, (b) detalle de la estructura de la celda dentro de un anillo de crecimiento anual, (c) la estructura de una celda incluye varias capas formadas por microfibrillas de fibras celulósicas, de fibras de hemicelulosa y de lignina y (d) cadenas de celulosa alineadas, parcialmente cristalinas existentes en la microfibrilla.



(a)



(b)

Figura 17-3 Estructura celular en (a) madera blanda y (b) madera dura. Las maderas blandas contienen celdas más grandes y más largas que las duras. Sin embargo, estas últimas contienen vasos de gran diámetro. El agua se transporta por las celdas en las maderas blandas; en las duras, por los vasos. (De J. M. Dinwoodie, *Wood: Nature's Cellular Polymeric Fiber-Composite*. The Institute of Metals, 1989.)

TABLA 17-1 ■ *Propiedades de maderas comunes*

Madera	Densidad (para un 12% de agua) (g/cm ³)	Módulo de elasticidad (psi)
Cedro	0.32	1 100 000
Pino	0.35	1 200 000
Abeto	0.48	2 000 000
Arce	0.48	1 500 000
Abedul	0.62	2 000 000
Roble	0.68	1 800 000

como en la estructura celulósica de las paredes de la celda, donde está más fuertemente unida a las fibras de celulosa. Aun cuando en un árbol vivo se almacena gran cantidad de agua, la cantidad de agua en la madera después de cortar el árbol dependerá, finalmente, de la humedad a la cual la madera está expuesta; una humedad más elevada aumenta la cantidad de agua en las paredes de las celdas. La densidad de la madera está dada por lo general a un contenido de humedad de 12%, lo que corresponde a 65% de humedad. En la tabla 17-1 aparecen la densidad y el módulo de elasticidad en dirección paralela al grano de varias maderas comunes, para este contenido normal de agua.

El siguiente ejemplo ilustra el cálculo de la densidad de la madera.

EJEMPLO 17-1 *Densidad de la madera seca y húmeda*

Una madera verde tiene una densidad de 0.86 g/cm³ y contiene 175% de agua. Calcule la densidad de la madera totalmente seca.

SOLUCIÓN

Una muestra de 100 cm³ de la madera debe pesar 86 g. A partir de la ecuación 17-1, podemos determinar el peso de la madera seca como:

$$\begin{aligned}
 \% \text{ de agua} &= \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso de la madera seca}} \times 100 = 175 \\
 &= \frac{\text{Peso verde} - \text{peso seco}}{\text{Peso seco}} \times 100 = 175 \\
 \text{Peso de la madera seca} &= \frac{(100)(\text{Peso verde})}{275} \\
 &= \frac{(100)(86)}{275} = 31.3 \text{ g}
 \end{aligned}$$

$$\text{Densidad de la madera seca} = \frac{31.3 \text{ g}}{100 \text{ cm}^3} = 0.313 \text{ g/cm}^3$$

17-3 Propiedades mecánicas de la madera

La resistencia de la madera depende de su densidad, misma que a su vez depende tanto del contenido de agua como del tipo de madera. Conforme la madera se seca, primero se elimina

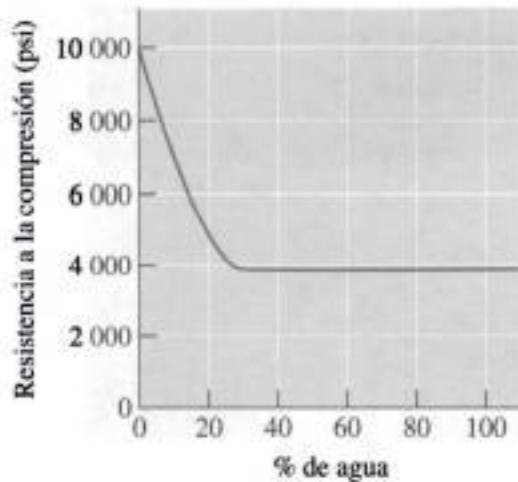


Figura 17-4
Efecto del porcentaje de agua en una madera común sobre la resistencia a la compresión en dirección paralela al grano.

el agua de los vasos y después de las paredes de las celdas. Si se elimina el agua de los vasos no se observa prácticamente ningún cambio en la resistencia o rigidez de la madera (Fig. 17-4). Sin embargo, si el proceso de secado continúa hasta menos de aproximadamente 30% de agua, hay pérdida de agua de las fibras de celulosa propiamente dichas. Esta pérdida permite que las fibras individuales se acerquen unas a otras, lo que aumenta la unión entre las fibras, así como la densidad de la madera y, por lo tanto, incrementa la resistencia y la rigidez de la misma.

El tipo de madera también afecta a la densidad. Dado que tienen una menor cantidad de madera tardía de densidad más elevada, las maderas blandas normalmente son menos densas y, por tanto, tienen resistencias inferiores que las maderas duras. Además, las celdas en las maderas blandas son más grandes, más largas y más abiertas que las de las maderas duras, lo que también resulta en una densidad menor.

Las propiedades mecánicas de la madera son altamente anisotrópicas. En la dirección longitudinal (Fig. 17.5), una carga a la tensión aplicada actúa en dirección paralela a las microfibrillas y a las cadenas celulósicas en la sección media de la pared secundaria. Estas cadenas son resistentes, puesto que principalmente son cristalinas, y pueden soportar una carga relativamente alta. Sin embargo, en las direcciones radial y tangencial, las débiles uniones entre las microfibrillas y las fibras celulósicas se pueden romper, lo que resulta en propiedades a la tensión muy bajas. Un comportamiento similar se observa en cargas a compresión y a flexión. En razón del comportamiento anisotrópico, la mayoría de las maderas se cortan en forma tangencial longitudinal o radial longitudinal. Este tipo de corte maximiza el comportamiento longitudinal de la madera.

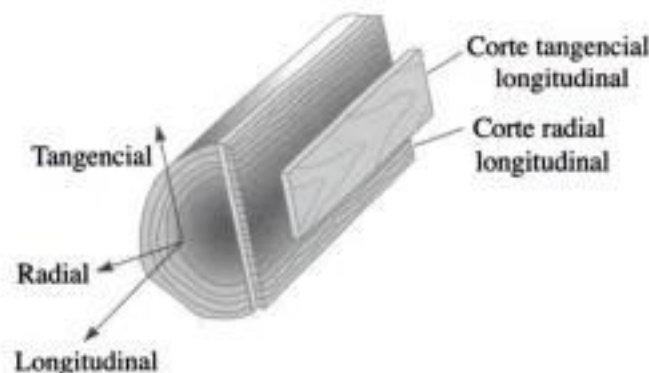


Figura 17-5
Diferentes direcciones en un leño. La madera tiene un comportamiento anisotrópico debido a diferencias en orientación de las celdas y del grano.

entre sí; por lo general, se utiliza un número impar de capas. Es importante cerciorarse de que estos ángulos resulten lo más preciso posible para asegurar que la madera contrachapada no se va a torcer o pandear al cambiar el contenido de humedad de la misma. Cada una de las capas individuales por lo general están unidas entre sí mediante una resina fenólica termoestable. La resina se introduce entre las capas, que después se someten a presión mientras están calientes para hacer que la resina se polimerice.

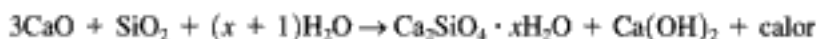
También se fabrican productos de madera de tipo similar en forma de materiales compuestos "laminares". Las capas visibles pueden ser de una madera dura más costosa, y las capas intermedias de una madera blanda menos costosa. Se pueden compactar partículas de madera en forma de hojas y laminarse entre dos capas de madera para producir hojas de aglomerado. Las capas de madera se pueden utilizar como caras (o "tapas") para materiales con estructura de panal.

17-6 Materiales de concreto

Un **agregado** es una combinación de grava, arena, piedras trituradas o escoria. Un **mortero** se hace mezclando cemento, agua, aire y un agregado fino. El concreto contiene todos los ingredientes del mortero más los agregados gruesos. Los **cementos** son materiales inorgánicos que se aplican y endurecen después de ser mezclados para formar una pasta usando agua. El **concreto** es un material compuesto particulado (o constituido con agregados) en el cual tanto los agregados como la matriz son materiales cerámicos. En el concreto, la arena y un agregado grueso se unen en una matriz de cemento Portland. Una reacción de cementación que ocurre entre el agua y los minerales del cemento proporciona una matriz resistente que sujeta los agregados y proporciona una resistencia buena a la compresión para el concreto.

Cementos Se clasifican como hidráulicos y no hidráulicos. Los **cementos hidráulicos** fraguan y se endurecen en presencia el agua. Los **cementos no hidráulicos** (por ejemplo, la cal, el CaO) no pueden fraguar en presencia del agua; para su endurecimiento necesitan aire.[6] El cemento Portland es el material manufacturado para la construcción de más amplio uso. Fue patentado por Joseph Aspdin en 1824 y se llama así en honor a los acantilados de piedra caliza de la isla de Portland, en Inglaterra.[7]

El cemento hidráulico se fabrica a partir de silicatos de calcio, con una composición aproximada de CaO (~60 a 65%), SiO_2 (~20 a 25%) y óxido de hierro y alúmina (~7 a 12%). El aglutinante de cemento, que es de partículas muy pequeñas, está compuesto de varias relaciones de $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ y de otros minerales. En terminología del cemento, a veces CaO , SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 se conocen como *C*, *S*, *A* y *F*, respectivamente. Por tanto, C_3S significa $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. Cuando se le agrega agua al cemento, ocurre una reacción de hidratación que produce un gel sólido que une las partículas de agregados. Las reacciones posibles incluyen



Después de la hidratación, el cemento proporciona la unión para las partículas de agregados. En consecuencia, debe adicionarse suficiente cemento para recubrir todas las partículas de agregados. Normalmente, el cemento constituye del orden de 15% volumétrico de los sólidos dentro del concreto.

La composición del cemento ayuda a determinar la velocidad del fraguado y las propiedades finales del concreto. Por ejemplo, el $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ y el $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ producen fraguados rápidos, pero bajas resistencias. El $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ reacciona más lentamente durante la

La composición del cemento también afecta la resistencia del concreto al ambiente. Por ejemplo, los sulfatos existentes en el suelo pueden atacar el concreto; proporciones más elevadas de $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ y de $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ayudan a producir concretos más resistentes al sulfato, como en el tipo V.

Arena Desde un punto de vista químico, la arena es predominantemente sílice (SiO_2). Las arenas son minerales finos, comúnmente con un espesor del orden de 0.1 a 1.0 mm de diámetro. Con frecuencia contienen por lo menos cierta agua absorbida, que debe tomarse en consideración al preparar una mezcla de concreto. La arena ayuda a llenar los huecos entre agregados más gruesos, lo que da un factor de empaquetamiento alto, reduce la cantidad de porosidad abierta (o interconectada) en el concreto terminado y reduce problemas de desintegración del concreto debido a congelamiento y descongelamiento repetidos durante su vida.

Agregados Los agregados gruesos están compuestos de grava y de roca. Los agregados deben de estar limpios, ser resistentes y durables. Las partículas de agregados que tienen una forma angular redonda proporcionan resistencia a causa del entrelazamiento mecánico entre las mismas, pero las partículas angulares también presentan una mayor superficie en la cual se pueden formar huecos o grietas. Normalmente se prefiere que el tamaño de los agregados sea grande; este estado también minimiza el área de la superficie en la cual pueden formarse grietas o huecos. El tamaño del agregado deberá, naturalmente, corresponder con el tamaño de la estructura que se está produciendo; las partículas de agregados no deben ser más largas que 20% del espesor de la estructura.

En algunos casos, se pueden utilizar agregados especiales. Se pueden preparar concretos ligeros utilizando escorias minerales producidas durante operaciones siderúrgicas; estos concretos tienen un aislamiento térmico mejor. Se pueden producir concretos particularmente pesados utilizando minerales densos o incluso granalla de metal; estos concretos pesados se pueden utilizar en la construcción de reactores nucleares para una mejor absorción de la radiación. En la tabla 17-6 se presentan las densidades de varios agregados.

TABLA 17-6 ■ Características de los materiales para elaborar concretos

Material	Densidad real	
Cemento	190 lb/ft ³	Donde un saco = 94 lb
Arena	160 lb/ft ³	
Agregado	170 lb/ft ³	Normal
	80 lb/ft ³	Escoria ligera
	30 lb/ft ³	Vermiculita ligera
	280 lb/ft ³	Fe_3O_4 pesado
	390 lb/ft ³	Ferrofósforo pesado
Agua	62.4 lb/ft ³	Con 7.48 gal/pies ³

17-7 Propiedades del concreto

Muchos factores influyen sobre las propiedades del concreto. Algunos de los más importantes son la proporción agua-cemento, la cantidad de aire contenido y el tipo de agregados.

Relación agua-cemento La relación del agua al cemento afecta el comportamiento de concreto de varias formas:

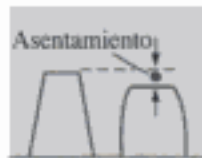


Figura 17-8

Prueba de asentamiento en la cual se mide la deformación de una figura de concreto sujeta a su propio peso y que sirve para determinar la trabajabilidad de una mezcla de concreto.

1. Debe agregarse una cantidad mínima de agua al cemento para asegurar que la totalidad del mismo experimenta la reacción de hidratación. Por lo tanto, contenidos de agua demasiado pequeños causan una resistencia baja. Sin embargo, normalmente el límite inferior de la relación agua-cemento queda determinado por otros factores, como su trabajabilidad, por ejemplo.

2. Una proporción elevada de agua-cemento mejora la **trabajabilidad** del concreto, esto es, la facilidad con la que la lechada o pasta aguada de concreto puede llenar todos los espacios de un encofrado. Las bolsas de aire o la porosidad interconectada causadas por una mala trabajabilidad del concreto reducen la resistencia y la durabilidad de la estructura de concreto. Esta trabajabilidad se puede medir utilizando una *prueba de asentamiento*. Por ejemplo, se produce una pieza de concreto de 12 pulg de altura (Fig. 17-8), que se deja sin tocar, soportada por su propio peso. Después de un lapso de tiempo, la pieza se deforma. La reducción de altura de la pieza se llama **asentamiento**. Por lo común, para lograr tener trabajabilidad, se necesita que el concreto tenga una relación agua-cemento mínima de aproximadamente 0.4 (por peso). Un asentamiento más pronunciado, causado por una mayor relación agua-cemento, indica una trabajabilidad mayor. Los asentamientos de 1 a 6 pulgadas son comunes; se necesitan asentamientos pronunciados para vaciar o colar encofrados angostos o complejos, en tanto que los asentamientos ligeros pueden resultar satisfactorios para estructuras grandes, tales como cortinas de presas.

3. Si se incrementa la relación agua-cemento más allá del mínimo requerido para su trabajabilidad, se reduce la resistencia a la compresión del concreto. La resistencia a la compresión se mide generalmente determinando el esfuerzo requerido para triturar un cilindro de concreto de 6 pulg de diámetro y de 12 pulg de altura. La figura 17-9 muestra el efecto de la relación agua-cemento en la resistencia del concreto.

4. Las proporciones elevadas de agua-cemento incrementan la contracción del concreto durante el fraguado, creando un riesgo de agrietamiento.

Debido a los diferentes efectos causados por la relación agua-cemento, es necesario llegar a un término medio entre resistencia, trabajabilidad y contracción. Una relación de peso común es de 0.45 a 0.55. A fin de mantener una buena trabajabilidad, pueden agregarse plastificantes orgánicos a la mezcla, con muy pocos efectos sobre la resistencia.

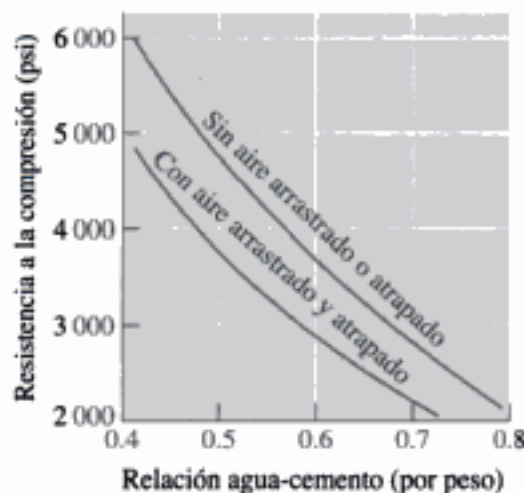


Figura 17-9

Efecto de la relación agua-cemento, así como el aire arrastrado y atrapado sobre la resistencia a la compresión del concreto a los 28 días.

EJEMPLO 17-2 Composición del concreto

Determine las cantidades de agua, cemento, arena y agregados para cinco yardas cúbicas de concreto, suponiendo que deseamos obtener una proporción agua-cemento de 0.4 (por peso) y que la proporción cemento-arena-agregados es de 1:2.5:4 (por peso). Se usará un agregado "normal", con 1% de agua; la arena contiene 4% de agua. Suponga que no queda arrastrado aire en el interior del concreto.

SOLUCIÓN

Un método para calcular la mezcla de concreto consiste en determinar primero el volumen de cada constituyente con base en un saco de cemento (94 lb). Debemos tener en mente que después de haber vaciado el concreto no existen huecos entre los diversos componentes; entonces, es menester tomar en cuenta en nuestros cálculos la densidad real no la volumétrica de los constituyentes.

Para cada saco de cemento que usamos, el volumen de los materiales requeridos es:

$$\text{Cemento} = \frac{94 \text{ lb/saco}}{190 \text{ lb/ft}^3} = 0.495 \text{ ft}^3$$

$$\text{Arena} = \frac{2.5 \times 94 \text{ lb cemento}}{160 \text{ lb/ft}^3} = 1.469 \text{ ft}^3$$

$$\text{Grava} = \frac{4 \times 94 \text{ lb cemento}}{170 \text{ lb/ft}^3} = 2.212 \text{ ft}^3$$

$$\text{Agua} = \frac{0.4 \times 94 \text{ lb cemento}}{62.4 \text{ lb/ft}^3} = 0.603 \text{ ft}^3$$

$$\text{Volumen total del concreto} = 4.779 \text{ ft}^3/\text{saco de cemento}$$

Por tanto, en cinco yardas cúbicas (es decir 135 ft³), necesitaremos:

$$\text{Cemento} = \frac{135 \text{ ft}^3}{4.779 \text{ ft}^3/\text{saco}} = 28 \text{ sacos}$$

$$\text{Arena} = (28 \text{ sacos})(94 \text{ lb/saco})(2.5 \text{ arena/cemento}) = 6\,580 \text{ lb}$$

$$\text{Grava} = (28 \text{ sacos})(94 \text{ lb/saco})(4 \text{ grava/cemento}) = 10\,528 \text{ lb}$$

$$\text{Agua} = (28 \text{ sacos})(94 \text{ lb/saco})(0.4 \text{ agua/cemento}) = 1\,054 \text{ lb}$$

Pero la arena contiene 4% de agua y la grava 1%. Para obtener el peso de la arena y de la grava húmedas, debemos hacer un ajuste en el contenido de agua de cada una de ellas:

$$\text{Arena} = (6\,580 \text{ lb secas})(1.04) = 6\,843 \text{ lb más agua} = 263 \text{ lb}$$

$$\text{Grava} = (10\,528 \text{ lb secas})(1.01) = 10\,633 \text{ lb más agua} = 105 \text{ lb}$$

Por tanto, realmente sólo necesitamos agregar:

$$\begin{aligned} \text{Agua} &= 1\,054 \text{ lb} - 263 \text{ lb} - 105 \text{ lb} = 686 \text{ lb} \\ &= \frac{(686 \text{ lb}) \times 7.48 \text{ gal/ft}^3}{62.4 \text{ lb/ft}^3} = 82 \text{ gal} \end{aligned}$$

En consecuencia, recomendamos que se combinen 28 sacos de cemento, 6 843 lb de arena y 10 633 lb de grava con 82 galones de agua.

EJEMPLO 17-3**Diseño de una mezcla de concreto para un muro de retención**

Diseñe una mezcla de concreto que proporcione, a los 28 días, una resistencia a la compresión de 4 000 psi para la construcción de un muro de retención de 5 pulg de espesor y 6 ft de altura. Se espera tener aproximadamente 2% de aire atrapado en el concreto, a pesar de que no lo arrastraremos intencionalmente. Nuestra grava contiene 1% de humedad y sólo tenemos disponible arena gruesa con 5% de humedad.

SOLUCIÓN

Se necesita cierta trabajabilidad en el concreto, a fin de estar seguros de que el encofrado se llenará totalmente con el concreto. Podría resultar apropiado un asentamiento de 3 pulg para esta aplicación. El espesor de la pared es de 5 pulg. A fin de minimizar en lo posible los costos, utilizaremos grava grande: un agregado de 1 pulg de diámetro será el apropiado (aproximadamente 1/5 del espesor de la pared).

Para obtener la trabajabilidad deseada, utilizando grava de 1 pulg, deberemos usar aproximadamente 320 lb de agua por yarda cúbica (Fig. 17-10).

Para obtener una resistencia a la compresión de 4 000 psi después de 28 días (suponiendo que no hay aire atrapado intencionalmente), necesitamos una proporción en peso de agua a cemento de 0.57 (Fig. 17-9).

En consecuencia, el peso del cemento requerido por yarda cúbica de concreto es de (320 lb de agua/0.57 agua-cemento) = 561 lb de cemento.

En vista de que el tamaño de nuestra grava es de una pulgada y sólo tenemos disponible arena gruesa, la proporción volumétrica de la grava al concreto es de 0.7 (Fig. 17-11). Entonces, la cantidad de grava requerida por yarda cúbica de concreto es de 0.7 yd³; sin embargo, esta cantidad está en función de la densidad volumétrica de la grava. Dado que la densidad volumétrica es de aproximadamente 60% de la densidad real, el volumen real ocupado por la grava dentro del concreto es 0.7 yd³ × 0.6 = 0.42 yd³.

Determinemos el volumen de cada uno de los constituyentes por yarda cúbica de concreto con la finalidad de calcular la arena requerida:

$$\text{Agua} = 320 \text{ lb}/62.4 \text{ lb}/\text{ft}^3 = 5.13 \text{ ft}^3$$

$$\text{Cemento} = 561 \text{ lb}/190 \text{ lb}/\text{ft}^3 = 2.95 \text{ ft}^3$$

$$\text{Grava} = 0.42 \text{ yd}^3 \times 27 \text{ ft}^3/\text{yd}^3 = 11.34 \text{ ft}^3$$

$$\text{Aire} = 0.02 \times 27 \text{ ft}^3 = 0.54 \text{ ft}^3$$

$$\text{Arena} = 27 - 5.13 - 2.95 - 11.34 - 0.54 = 7.04 \text{ ft}^3$$

O convirtiendo a otras unidades y suponiendo que la grava y la arena están secas:

$$\text{Agua} = 5.13 \text{ ft}^3 \times 7.48 \text{ gal}/\text{ft}^3 = 38.4 \text{ gal}$$

$$\text{Cemento} = 561 \text{ lb}/94 \text{ lb}/\text{saco} = 6 \text{ sacos}$$

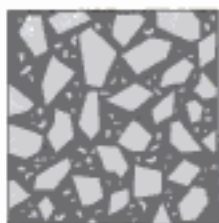
$$\text{Grava} = 11.34 \text{ ft}^3 \times 170 \text{ lb}/\text{ft}^3 = 1928 \text{ lb}$$

$$\text{Arena} = 7.04 \text{ ft}^3 \times 160 \text{ lb}/\text{ft}^3 = 1126 \text{ lb}$$

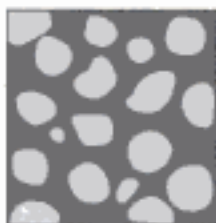
Sin embargo, tanto la grava como la arena están húmedas. Así, las cantidades reales de grava y de arena necesarias son:

$$\text{Grava} = 1928 \times 1.01 = 1\,948 \text{ lb (20 lb de agua)}$$

$$\text{Arena} = 1126 \times 1.05 = 1\,182 \text{ lb (56 lb de agua)}$$



(a)



(b)

Figura 17-12

Estructura ideal para el asfalto (a) en comparación con la estructura no deseable, (b) en la cual, los granos redondeados, su tamaño y uniformidad, así como el exceso de aglutinante repercuten en una reducción de la resistencia del material final.

El agregado, como en el caso del concreto, debe estar limpio, tener ángulos y una distribución de tamaños de grano a fin de lograr un elevado factor de compactación y un buen entrelazamiento entre sus granos (Fig. 17-12). El aglutinante, compuesto de cadenas termoplásticas, une a las partículas de agregados. El aglutinante tiene un rango de temperatura útil relativamente estrecho, ya que se hace frágil a temperaturas inferiores a 0 y empieza a fundirse a temperaturas relativamente bajas. Se pueden utilizar aditivos como la gasolina y el queroseno para modificar el aglutinante, permitir que se licue más fácilmente durante su mezclado y acelerar su fraguado después de su aplicación.

La proporción de aglutinante a agregados es importante. Deberá añadirse justo la cantidad suficiente de aglutinante, de manera que las partículas del agregado se toquen, minimizando los huecos. Un exceso de aglutinante permitirá la deformación viscosa del asfalto bajo carga. En un asfalto típico se encuentra presente aproximadamente 5 a 10% de betumen. También se requiere de un poco de espacios huecos, por lo general de 2 a 5%. Cuando el asfalto se somete a compresión, el aglutinante puede pasar a los huecos, en vez de ser expulsado de la superficie y perderse. Sin embargo, demasiado espacio hueco permite que el agua entre en la estructura; esto incrementa la rapidez de deterioro del asfalto y puede fragilizar al aglutinante. El **glasfalto** es una aplicación útil del vidrio triturado. De manera similar, también existen aplicaciones para materiales desarrollados con asfalto y neumáticos hechos jirones.

RESUMEN

- Los materiales para la construcción son materiales compuestos que se presentan en la naturaleza o se producen a partir de materiales naturales. Estos materiales desempeñan una función vital en la infraestructura de cualquier país. Los materiales para la construcción más frecuentemente vistos son el concreto, la madera, el asfalto, los vidrios, los materiales compuestos y los aceros.
- También los materiales avanzados utilizados en la fabricación de sensores y accionadores representan un papel de importancia creciente en la vigilancia de la salud estructural de edificios y puentes. También existen nuevos recubrimientos y películas delgadas sobre vidrios que han contribuido a una mayor eficiencia en el uso de la energía en los edificios.
- La madera es un material compuesto polimérico reforzado con fibras de origen natural. Las fibras de celulosa están formadas por celdas alineadas que proporcionan un excelente refuerzo en la dirección longitudinal de la madera, pero poca resistencia y rigidez en direcciones perpendiculares a las celdas y a las fibras. Las propiedades de la madera, por lo tanto, son altamente anisotrópicas y dependen de la especie del árbol y de la cantidad de humedad presente en la madera. La madera también tiene una buena resistencia a la tensión, pero una deficiente resistencia a la compresión.

- El concreto es un material compuesto particulado (o a base de agregados). En el concreto se utilizan partículas cerámicas como la arena y la grava como rellenos en una matriz de cemento cerámico. La proporción agua-cemento es un factor de particular importancia que determina el comportamiento del concreto. Este comportamiento se puede modificar arrastrando aire y variando la composición tanto del cemento como de los materiales agregados. El concreto tiene una buena resistencia a la compresión, pero su resistencia a la tensión es mala.
- El asfalto también es un material compuesto particulado; utiliza el mismo tipo de agregados que el concreto, pero en un aglutinante polimérico orgánico.

GLOSARIO

Agregado Agregado es una combinación de grava, arena, piedras trituradas o escoria.

Albura Celdas huecas vivas de la madera que almacenan los nutrimentos y que sirven de conducto para el agua.

Asentamiento Reducción en peralte de una forma estándar de concreto cuando éste se asienta por efecto de su propio peso.

Betumen Aglutinante orgánico para el asfalto, formado de polímeros y aceites de bajo punto de fusión.

Cámbium Capa de celdas en crecimiento en la madera.

Capas Hojas individuales de chapa de madera con las cuales se fabrica la madera contrachapada o triplay.

Celulosa Fibra polimérica natural con un alto grado de polimerización; es el más importante de los constituyentes de la madera.

Cemento hidráulico Cemento que fragua y se endurece bajo el agua.

Cemento Portland Cemento hidráulico producido pulverizando la escoria, hecho a base de silicatos de calcio; su composición aproximada es CaO (~60-65%), SiO_2 (~20-25%), así como óxido de hierro y alúmina (~7-12%).

Cementos Materiales inorgánicos que fraguan y se endurecen después de haberse mezclado con agua en una pasta.

Cementos no hidráulicos Cementos que no pueden endurecerse bajo el agua y que requieren aire para su endurecimiento.

Duramen Centro del árbol, formado de celdas muertas, que le da soporte mecánico al árbol.

Extractivos Impurezas existentes en la madera.

Glasfalto Asfalto cuyo agregado incluye vidrio reciclado.

Hemicelulosa Fibra polimérica natural con un bajo grado de polimerización; es un constituyente importante en la madera.

Lignina Cemento polimérico en la madera que une entre sí las celdas de celulosa de la misma.

Microfibrilla Paquetes de celulosa y otras cadenas poliméricas que sirven de fibras de refuerzo en la madera.

Mortero Se elabora mezclando cemento, agua, aire y agregados finos. El concreto tiene todos los agregados del mortero y además agregados gruesos.

Trabajabilidad Facilidad con que una lechada de concreto llena todo el espacio del interior de un encofrado.

ADICIONAL

1. CHONG, K. *Se reconocen las discusiones técnicas*, 2001.
2. DHEKNEY, V. *Se reconocen las discusiones*, 2002.
3. GREENBERG, C. B. "Thin Films on Float Glass: The Extraordinary Possibilities", *J. of Indu. Chemi.*, 40(1), 2001, pp. 26-32.
4. GREENBERG, C. *Se reconocen las discusiones de lentes con autolimpiado y del uso de recubrimientos de película fina*, 2002.
5. BRANTLEY, R. L. y R. Y. BRANTLEY. *Building Materials Technology*, McGraw Hill, 1996.
6. DERUCHER, K.N., G. P. KORFIATIS y A. S. EZELDIN. *Materials for Civil and Highway Engineers*, Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall, 1998.
7. MAMLOUK, M. S. y J. P. ZANTEWSKI. *Materials for Civil and Construction Engineers*, Addison-Wesley, 1999.

✓ PROBLEMAS

Sección 17-1 Estructura de la madera

Sección 17-2 Contenido de humedad y densidad de la madera

Sección 17-3 Propiedades mecánicas de la madera

Sección 17-4 Dilatación y contracción de la madera

Sección 17-5 Madera contrachapada o triplay

- 17-1 Una muestra de madera de dimensiones $3 \times 4 \times 12$ pulg tiene una densidad en seco de 0.35 g/cm^3 .
- a) Calcule la cantidad de galones de agua que la muestra debe absorber para que llegue a contener 120% de agua.
 - b) Calcule la densidad de la madera después de que haya absorbido esta cantidad de agua.
- 17-2 La densidad de una muestra de roble es 0.90 g/cm^3 . Calcule
- a) la densidad del roble totalmente seco y
 - b) el porcentaje de humedad en la muestra original.
- 17-3 En una sala de 60×60 pies se utiliza un piso hecho de tabloncillos de arce de 1 pulg de espesor, 6 pulg de ancho y 16 pies de largo. Los tabloncillos fueron cortados utilizando un corte tangencial-longitudinal. El piso se coloca cuando los tabloncillos alcanzan un contenido de humedad de 12%. Después de algunos días particularmente húmedos, la humedad en los tabloncillos aumenta hasta 45%. Determine el cambio dimensional en el piso en la dirección paralela a los tabloncillos y también perpendicular a los mismos. ¿Qué le pasará al piso? ¿Cómo puede corregirse este fenómeno?

- 17-4 Se está construyendo un muro de 30 pies de largo utilizando cortes radiales-longitudinales de pino de 5 pulg de ancho y disponiendo los tabloncillos en forma vertical. La madera contiene 55% de humedad al construirse el muro; sin embargo, se mantiene el nivel de humedad en la habitación para darle 45% de humedad a la madera. Determine los cambios dimensionales que ocurrirán en los tabloncillos de madera y estime el tamaño de los huecos que se producirán como consecuencia de dichos cambios.

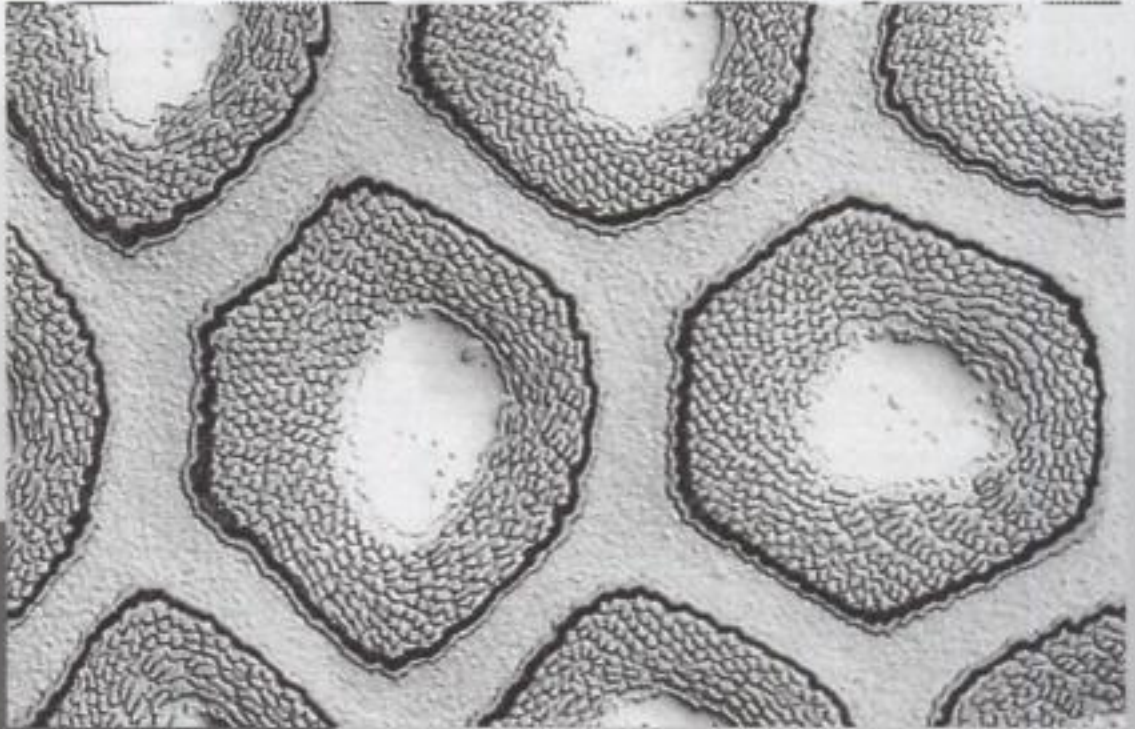
Sección 17-6 Materiales de concreto

Sección 17-7 Propiedades del concreto

Sección 17-8 Concreto reforzado y preesforzado

Sección 17-9 Asfalto

- 17-5 Se nos ha solicitado preparar 100 yd^3 de concreto normal utilizando una proporción volumétrica de cemento-arena-grava de 1:2:4. La proporción agua-cemento (por peso) debe ser 0.5. La arena contiene 6% y la grava 3% en peso de agua. No se espera tener aire atrapado.
- a) Determine el número de sacos de cemento que deben pedirse, las toneladas de arena y de grava requeridas, así como el agua necesaria.
 - b) Calcule el peso total del concreto por yarda cúbica.
 - c) ¿Cuál es la proporción en peso del cemento-arena-grava?
- 17-6 Planeamos preparar 10 yd^3 de concreto utilizando una proporción en peso de 1:2.5:4.5 de cemento-arena-grava. La proporción agua-cemento (en peso)



La estructura de un alambre superconductor de Nb_3Sn para aplicaciones magnéticas de altos valores de campo incluye muchas fibras complejas en su interior. En esta micrografía tomada con una ampliación de 1 000 x, las fibras están incrustadas en una matriz continua de cobre. El núcleo blanco de cada una de las fibras es estaño, y la capa de apariencia pedregosa alrededor de cada núcleo contiene más de 100 minúsculos filamentos de niobio. El anillo oscuro alrededor de cada fibra es vanadio; el anillo claro alrededor del vanadio es niobio. Estos dos anillos impiden que el cobre se difunda en las fibras. Durante un tratamiento térmico posterior, los filamentos de niobio reaccionan con el estaño convirtiéndose en filamentos de Nb_3Sn (De ASM Handbook, vol. 2, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Alloys* (1990), ASM International, Materials Park, OH 44073).

PARTÉ 4

CAPÍTULO 18*Materiales electrónicos***CAPÍTULO 19***Materiales magnéticos***CAPÍTULO 20***Materiales fotónicos***CAPÍTULO 21***Propiedades térmicas
de los materiales*

Propiedades físicas de los materiales de ingeniería

El comportamiento físico de los materiales está definido por una diversidad de propiedades eléctricas, magnéticas, ópticas y térmicas. La mayoría de estas propiedades está determinada por su estructura y arreglo atómicos, así como por la estructura cristalina del material. En el capítulo 18 veremos que la estructura atómica, en particular la brecha de energía entre electrones en las bandas de valencia y de conducción, nos ayudarán a divi-

dir los materiales en conductores, semiconductores y aislantes. La estructura atómica es responsable del comportamiento ferromagnético, que se analizará en el capítulo 19, y explica muchas propiedades ópticas (capítulo 20) y térmicas (capítulo 21). En esta parte se exponen los aspectos modernos de la ciencia y tecnología de los materiales en lo que se refiere al magnetismo, la microelectrónica y la óptica.

By Arkanosant...

Capítulo



Entre los materiales electrónicos se incluyen los aislantes, los semiconductores, los conductores y los superconductores. Esta familia de materiales ha causado una verdadera revolución en el mundo. Desde las bujías fabricadas con alúmina y los alambres de cobre para la transmisión eléctrica, hasta los componentes para las comunicaciones inalámbricas, imanes de alta potencia utilizados en la imagen de resonancia magnética, capacitores, inductores, celdas solares, despliegues de matriz activa, chips y microprocesadores de computación basados en silicio y en arseniuro de galio, los materiales electrónicos se encuentran en incontables aplicaciones. Los avances en la ciencia de los materiales han causado varios adelantos importantes en el desarrollo de nuevos materiales electrónicos. Gracias a las relaciones de síntesis, procesamiento y propiedad desarrolladas utilizando una metodología científica para los materiales, tenemos hoy día materiales cerámicos que no sólo son excelentes aislantes, sino también semiconductores y superconductores. De manera similar, tenemos ahora polímeros que son semiconductores y, todavía más recientemente, se ha anunciado el descubrimiento de un polímero superconductor. (Cortesía de PhotoDisc/Getty Images.)

Copyrighted material

Materiales electrónicos

¿Alguna vez se preguntó...

- ...podemos fabricar circuitos electrónicos ligeros y flexibles utilizando plásticos?
- ...cuál es la razón de que los fabricantes de automóviles estén estudiando la posibilidad de pasar a un sistema eléctrico con una batería de 42 voltios?
- ...cuáles son los materiales para crear algunos de los electroimanes más poderosos que se utilizan en la imagen de resonancia magnética?
- ...cuál es la diferencia entre un conductor y un superconductor?
- ...cómo calienta los alimentos el horno de microondas?
- ...cómo funciona un encendedor de chispa en un asador de gas?
- ...pueden los materiales cerámicos ser semiconductores o superconductores?
- ...qué material se utiliza para generar el sonido de alta fidelidad en un altavoz para altas frecuencias?

Desde los novedosos polímeros que exhiben un comportamiento semiconductor hasta los superconductores cerámicos o las celdas solares de silicio amorfo y los alambres de aluminio utilizados en la transmisión de la energía y la porcelana que se utiliza en los aislamientos eléctricos, los materiales electrónicos han tenido un papel determinante en el desarrollo de todas las tecnologías basadas en la computación y en la

información. La figura 18-1 presenta una amplia clasificación de algunos de los diferentes materiales electrónicos. Los circuitos semiconductores, integrados en chips de silicio (Si) o arseniuro de galio (GaAs), desempeñan un papel muy importante en muchos de nuestros modernos dispositivos, como los asistentes electrónicos personales, las computadoras, los teléfonos celulares, los televisores y las VCR. Otros materiales utilizados

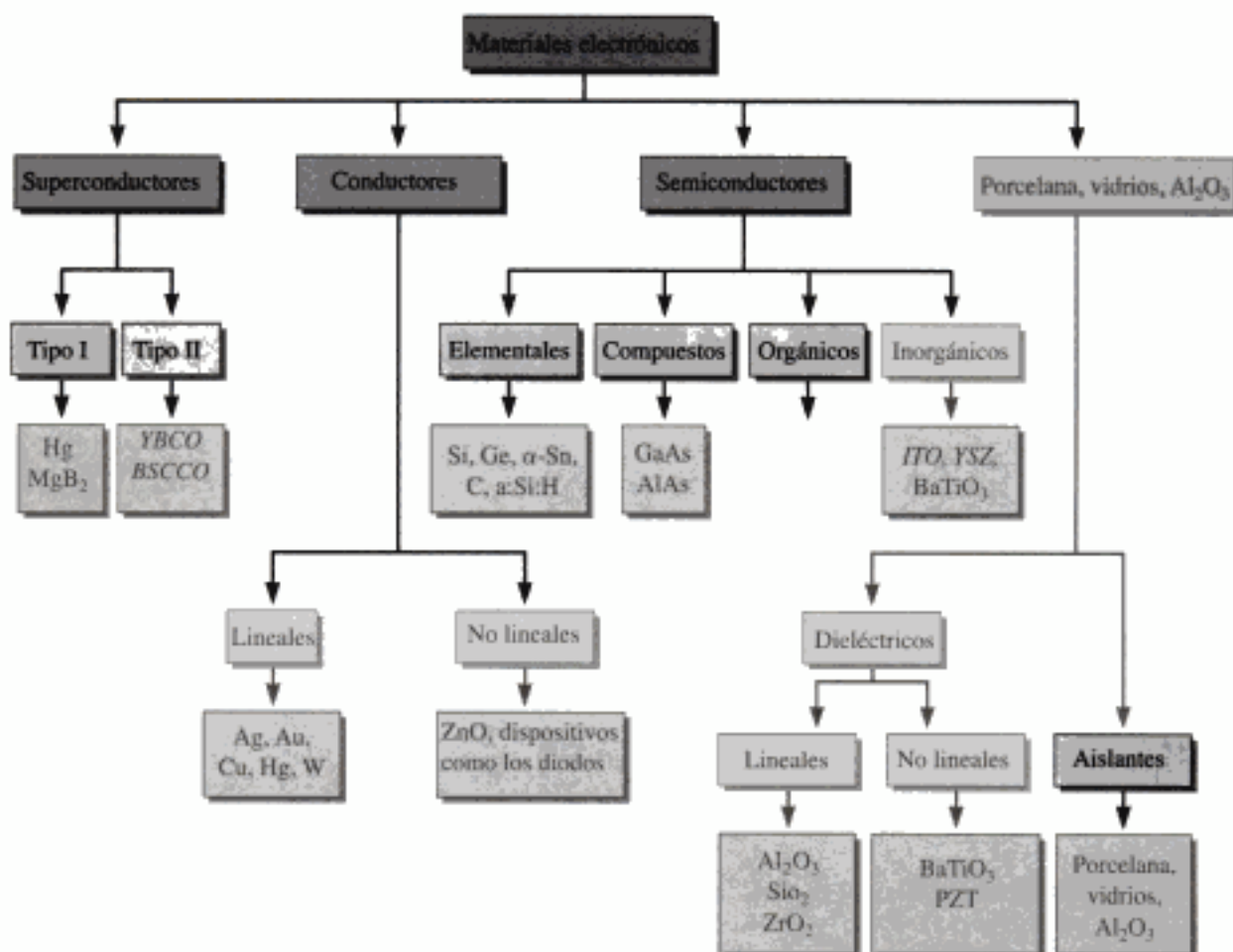


Figura 18-1 Clasificación de los materiales electrónicos tecnológicamente útiles.

para fabricar diodos emisores de luz (LED, por sus siglas en inglés), los láser, etc., tienen efectos electroópticos, en tanto que los materiales de silicio amorfo (a-Si:H) se utilizan en aplicaciones fotovoltaicas. Utilizamos porcelanas, alúmina y otros materiales cerámicos, así como materiales plásticos, en aplicaciones donde las propiedades de aislamiento eléctrico son importantes. Se utiliza aquí el término "materiales electrónicos" en un sentido genérico; incluye materiales que se utilizan en la microelectrónica, así como aquellos que se usan en la transmisión de la energía, el aislamiento eléctrico y otras aplicaciones a gran escala.

En el capítulo 2 hicimos hincapié en que, en aplicaciones de materiales electrónicos, otras propiedades (como las mecánicas) son importantes y deben tomarse en consideración al diseñar componentes. En el capítulo 3 examinamos las estructuras cristalinas o los arreglos atómicos en

materiales, como Si, GaAs, silicio amorfo, algunos superconductores de material cerámico, la alúmina y el titanato de bario. En los capítulos 4 y 5 analizamos ideas relevantes relacionadas con semiconductores intrínsecos y extrínsecos en lo que se refiere a los defectos puntuales y al concepto básico de la unión *p-n*. Analizamos la manera en que los defectos puntuales creados utilizando dopantes pueden conducir a conductividad en óxidos, como el óxido de estaño e indio (ITO, por sus siglas en inglés), así como la zirconia estabilizada con itria. En el capítulo 8 vimos el crecimiento cristalino de los semiconductores y de otros materiales. Un repaso de estos conceptos cubiertos en esos capítulos le sería de utilidad para comprender mejor los análisis que efectuaremos en este capítulo.

Para seleccionar y utilizar con eficacia materiales para aplicaciones de energía eléctrica y de

microelectrónica, primero deberemos comprender la forma en que se controlan las propiedades de dichos materiales. También es necesario darse cuenta de que el comportamiento eléctrico

de un material está influenciado por su microestructura y su procesamiento, así como el entorno al cual dicho material está expuesto.

18-1 Ley de Ohm y conductividad eléctrica

La mayoría de nosotros ya estamos familiarizados con la forma común de la ley de Ohm,

$$V = IR \quad (18-1)$$

donde V es el voltaje (voltios, V), I es la corriente (amps, A) y R es la resistencia (ohms, Ω) presentada al flujo de corriente. Esta ley es aplicable a la mayoría de, aunque no a todos, los materiales. La resistencia (R) de un resistor es una característica del tamaño, forma y propiedades de los materiales utilizados,

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{l}{\sigma A} \quad (18-2)$$

donde l es la longitud (cm) del resistor, A es el área transversal (cm^2) del resistor, ρ es la resistividad eléctrica ($\text{ohm} \cdot \text{cm}$, o $\Omega \cdot \text{cm}$) y σ , que es el recíproco de ρ , es la conductividad eléctrica ($\text{ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$). La magnitud de la resistencia depende de las dimensiones del resistor, así como de la microestructura y de la composición del material. La resistividad o conductividad no depende de las dimensiones del material; por tanto, la resistividad o la conductividad nos permiten comparar materiales diferentes. Por ejemplo, la plata es un mejor conductor que el cobre. La resistividad es una **propiedad sensible a la microestructura**, similar a la resistencia a la cedencia. La resistividad del cobre puro es mucho menor que la del cobre comercialmente puro, ya que las impurezas presentes en el cobre comercialmente puro dispersan los electrones y contribuyen a una mayor resistividad. De manera similar, la resistividad del cobre puro recocido es ligeramente inferior a la del cobre puro trabajado en frío, debido al efecto dispersante asociado con las dislocaciones. Existen ejemplos donde encontramos que la resistividad no parece depender de las dimensiones. Por ejemplo, si examinamos la resistividad del titanato de bario (BaTiO_3) en volumen (digamos un disco de $\frac{1}{2}$ cm de espesor y unos cuantos cm de diámetro) y en una película delgada (por ejemplo, de 100 nm de espesor), con frecuencia encontraremos que la resistividad del BaTiO_3 en volumen es superior al del BaTiO_3 en forma de película delgada. Por lo tanto, ¿no tenemos un valor de resistividad para el BaTiO_3 ? Estos fenómenos por lo general están relacionados con la microestructura, la homogeneidad química, la presencia de poros, la magnitud del campo eléctrico aplicado y así sucesivamente. En general, no debería sorprendernos que el BaTiO_3 tenga una resistividad superior a la del cobre, pero es importante notar que la resistividad del BaTiO_3 puede variar dependiendo de manera significativa de la presencia de impurezas, dopantes, poros, así como otras características microestructurales.

En componentes diseñados para conducir energía eléctrica, es importante minimizar las pérdidas, no sólo para conservar la energía sino también para minimizar el calentamiento. La energía eléctrica (P , en watts) perdida cuando fluye una corriente a través de una resistencia está dada por:

$$P = VI = I^2 R \quad (18-3)$$

Una resistencia R elevada da como resultado pérdidas de energía mayores. Estas pérdidas eléctricas también se conocen como pérdidas térmicas de Joule.

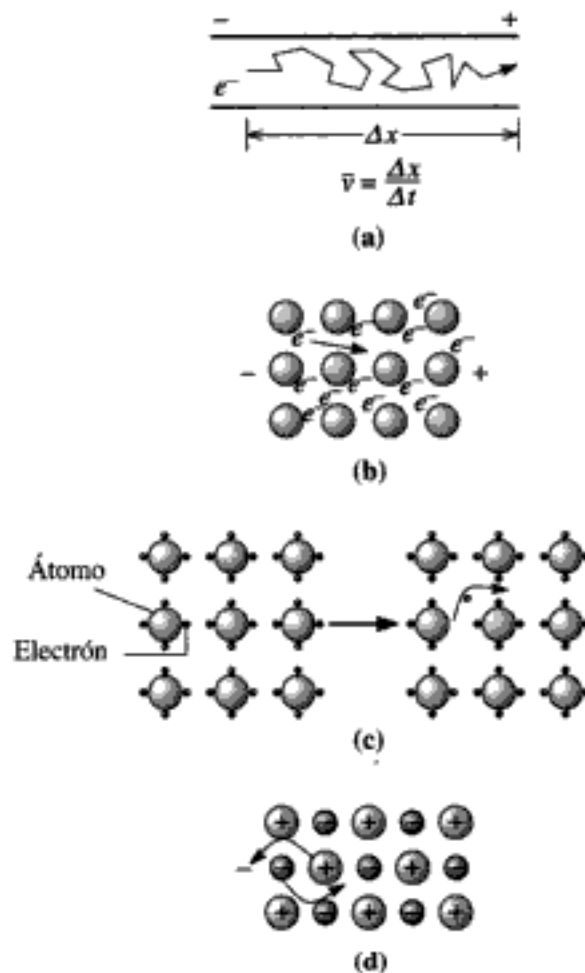


Figura 18-2

(a) Los portadores de carga, como los electrones, son desviados por los átomos o por defectos de red, siguiendo una trayectoria irregular a través de un conductor. La velocidad promedio a la cual se mueven los portadores es la velocidad de deriva $\bar{v}$. (b) Los electrones de valencia en la unión metálica se mueven con facilidad. (c) Los enlaces covalentes en los materiales semiconductores y en los aislantes deben romperse para que los electrones puedan moverse. (d) En muchos materiales enlazados iónicamente, es necesario que se difundan iones completos para transportar carga.

Mediante la combinación de las ecuaciones 18-1 y 18-2 se obtiene una segunda forma de la ley de Ohm:

$$\frac{I}{A} = \sigma \frac{V}{l} \quad (18-3a)$$

Si definimos I/A como la **densidad de la corriente** J (A/cm²) y V/l como el **campo eléctrico** E (V/cm), entonces:

$$J = \sigma E \quad (18-4)$$

También podemos determinar que la densidad de corriente J es

$$J = n \cdot q \cdot \bar{v}, \quad (18-4a)$$

donde n es el número de portadores de carga (portadores/cm³), q es la carga en cada uno de los portadores (1.6×10^{-19} C), y $\bar{v}$ es la **velocidad de deriva** o arrastre promedio (cm/s) a la cual se mueven los portadores de carga [Figura 18-2(a)]. Por tanto:

$$\sigma E = nq\bar{v} \quad \text{o} \quad \sigma = nq \frac{\bar{v}}{E} \quad (18-4b)$$

Recuerde que en el capítulo 5 analizamos la diferencia entre deriva (o arrastre) y difusión de los portadores. La difusión ocurre como resultado de gradientes de temperatura y de concen-

TABLA 18-1 ■ Conductividad eléctrica de materiales seleccionados a $T = 300\text{ K}$ *

Material	Conductividad ($\text{ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)
Superconductores	
Hg, Nb_3Sn , $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ MgB_2	Infinito (bajo ciertas condiciones, por ejemplo, bajas temperaturas)
Metales	
Metales alcalinos:	
Na	2.13×10^5
K	1.64×10^5
Metales alcalinotérreos	
Mg	2.25×10^5
Ca	3.16×10^5
Metales del Grupo IIIB	
Al	3.77×10^5
Ga	0.66×10^5
Metales de transición	
Fe	1.00×10^5
Ni	1.46×10^5
Metales del Grupo IB	
Cu	5.98×10^5
Ag	6.80×10^5
Au	4.26×10^5
Semiconductores	
Elementos del Grupo IVB:	
Si	5×10^{-6}
Ge	0.02
$\alpha\text{-Sn}$	0.9×10^5
Semiconductores compuestos	
GaAs	2.5×10^{-8}
AlAs	0.1
SiC	10^{-10}
Conductores iónicos	
Óxido de estaño indio (ITO)	
Zirconia estabilizada con itrio (YSZ)	
Aislantes, dieléctricos lineales y no lineales	
Polímeros:	
Polietileno	10^{-15}
Politetrafluoretileno	10^{-18}
Poliestireno	10^{-17} a 10^{-19}
Resina epóxica	10^{-12} a 10^{-17}
Materiales cerámicos	
Alúmina (Al_2O_3)	10^{-14}
Vidrios de silicato	10^{-17}
Nitruro de boro (BN)	10^{-13}
Titanato de bario (BaTiO_3)	10^{-14}
C (diamante)	$<10^{-18}$

* A menos que se especifique otra cosa, se supone un material de alta pureza.

EJEMPLO 18-2 Sistema de batería de 42 voltios para automóviles

Algunos fabricantes de automóviles están pensando en utilizar un sistema de batería de 42 voltios en lugar del sistema de batería estándar de 12/14 voltios. ¿Por qué cree usted que se está pensando en este cambio?

SOLUCIÓN

En algunas aplicaciones, como en el caso de los automóviles y las aeronaves, es importante reducir el peso general del vehículo. En el caso de los autos, esto significa un aumento en la utilización de aceros y materiales compuestos conformables, ligeros y de alta resistencia. Pero también existe la necesidad de aumento general de la energía, ya que los nuevos automóviles están equipados con muchas características electrónicas, como ventanillas y puertas eléctricas, puertas traseras eléctricas y alumbrado de tecnología de punta, así como sistemas de frenado y dirección de potencia. Si se aumenta el voltaje, ello significa que se necesitará menos corriente ($V = IR$), por lo que se puede reducir el peso total de los alambres de cobre. Un peso menor, tanto en el alambrado como en los motores, contribuye a un aumento de la eficiencia de combustible. Algunas razones adicionales para considerar la introducción de un sistema de batería de 42 voltios serían mayores requerimientos de potencia pico, control de la conducción y sistemas electrónicos avanzados.

EJEMPLO 18-3 Velocidad de deriva de los electrones en el cobre

Suponiendo que todos los electrones de valencia contribuyeran al flujo de corriente, (a) calcule la movilidad de un electrón en el cobre y (b) calcule la velocidad de deriva promedio para electrones en un alambre de cobre de 100 cm cuando se le aplica un voltaje de 10 voltios.

SOLUCIÓN

1. La valencia del cobre es uno; por tanto, el número de electrones de valencia es igual al número de átomos de cobre en el material. El parámetro de red para el cobre es 3.6151×10^{-8} cm y, en vista que el cobre es FCC, están presentes 4 átomos/celda unitaria. De la tabla 18-1, la resistividad es $1/\sigma = 1/5.98 \times 10^5 = 1.67 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$:

$$n = \frac{(4 \text{ átomos/celda})(1 \text{ electrón/átomo})}{(3.6151 \times 10^{-8} \text{ cm})^3} = 8.466 \times 10^{22} \text{ electrones/cm}^3$$

$$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$\mu = \frac{\sigma}{nq} = \frac{1}{pnq} = \frac{1}{(1.67 \times 10^{-6})(8.466 \times 10^{22})(1.6 \times 10^{-19})}$$

$$= 44.2 \frac{\text{cm}^2}{\Omega \cdot \text{C}} = 44.2 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

2. El campo eléctrico tiene un valor de:

$$E = \frac{V}{l} = \frac{10}{100} = 0.1 \text{ V/cm}$$

La movilidad es de $44.2 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$; por tanto:

$$\bar{v} = \mu E = (44.2)(0.1) = 4.42 \text{ cm/s}$$

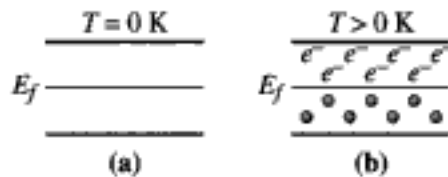


Figura 18-5

(a) En el cero absoluto, todos los electrones del nivel de energía más exterior tienen la energía más pequeña posible. (b) Al aumentar la temperatura, algunos de los electrones se excitan pasando a niveles no totalmente ocupados. Obsérvese que la energía de Fermi no cambia.

Los niveles de energía $3s$ son la **banda de valencia**. Los niveles de energía $3p$, que están separados de la banda $3s$ por una brecha de energía, forman la **banda de conducción**.

El sodio y otros metales alcalinos de la columna 1A de la tabla periódica solamente tienen un único electrón en el nivel s más externo. En el sodio, la banda de valencia $3s$ sólo está medio llena y, al cero absoluto de temperatura, sólo están ocupados los niveles de energía más bajos. La *energía de Fermi* (E_f) es la aquella a la cual la mitad de los niveles posibles de energía de la banda están ocupados por electrones.

Pero cuando se incrementa la temperatura del metal, algunos electrones adquieren energía y se excitan, pasando a los niveles de energía vacíos existentes en la banda de valencia (Fig. 18-5). Esta situación crea un número igual de niveles de energía vacíos, llamados **huecos**, que fueron desalojados por los electrones excitados [Fig. 18-5(b)]. Sólo se requiere de un pequeño aumento en energía para causar la excitación de los electrones. Tanto los electrones excitados como los huecos recién creados pueden entonces transportar la carga eléctrica.

Estructura de las bandas en el magnesio y en otros metales El magnesio y otros metales de la tabla periódica tienen dos electrones en su banda s más externa. Estos metales tienen una elevada conductividad debido a que la banda p se superpone sobre la banda s en el espaciado interatómico de equilibrio. Esta superposición permite que los electrones se exciten hacia el gran número de niveles de energía no ocupados de las bandas combinadas $3s$ y $3p$. La superposición de las bandas $3s$ y $3p$ en el aluminio y en otros metales de la columna IIIB tiene un efecto similar.

En los metales de transición, desde el escandio hasta el níquel, una banda $3d$ sin llenar está superpuesta sobre la banda $4s$. Esta superposición proporciona niveles de energía hacia los cuales se pueden excitar los electrones; sin embargo, las interacciones complejas entre bandas impiden que la conductividad sea tan elevada como en el caso de algunos mejores conductores. No obstante, en el cobre, la banda interna $3d$ está llena y el núcleo del átomo sujeta firmemente a estos electrones. En consecuencia, existe poca interacción entre los electrones de las bandas $4s$ y $3d$; así, el cobre tiene una elevada conductividad. Una situación similar ocurre en el caso de la plata y del oro.

Estructura de las bandas en semiconductores y en materiales aislantes Los elementos del grupo 4 —el carbono (diamante), el silicio, el germanio y el estaño— contienen dos electrones en su capa externa p , con una valencia de cuatro. Con base en nuestro análisis de la sección anterior, se esperaba que estos elementos tuvieran una elevada conductividad debido a la presencia de la banda p sin llenar, pero no se observa este comportamiento!

Estos elementos están enlazados de manera covalente; en consecuencia, los electrones en las bandas exteriores s y p están rígidamente unidos a los átomos. El enlace covalente produce un cambio complejo en la estructura de las bandas; es decir, una **hibridación**. Los niveles $2s$ y $2p$ de los átomos de carbono del diamante pueden contener hasta ocho electrones, pero sólo están disponibles cuatro electrones de valencia. Cuando los átomos de carbono se unen para formar un diamante sólido, los niveles $2s$ y $2p$ interactúan y producen dos bandas (Fig. 18-6). Cada banda híbrida puede contener $4N$ electrones. Dado que sólo hay $4N$ electrones disponibles, la banda inferior (o de valencia) está totalmente llena, en tanto que la banda superior (o de conducción) está vacía.

En el diamante, una gran **brecha de energía** o **brecha de banda** (E_g) separa los electrones de la banda de conducción ($E_g \sim 5.5$ eV). Pocos electrones poseen suficiente energía para saltar

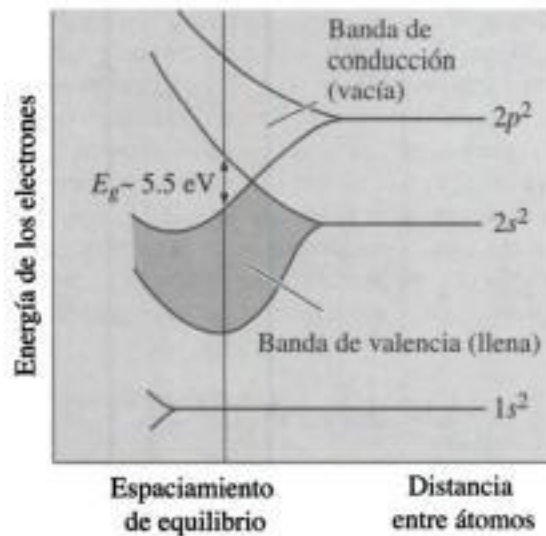


Figura 18-6 Estructura de las bandas del carbono en forma de diamante. Los niveles $2s$ y $2p$ se combinan para formar dos bandas híbridas separadas por una brecha de energía, E_g .

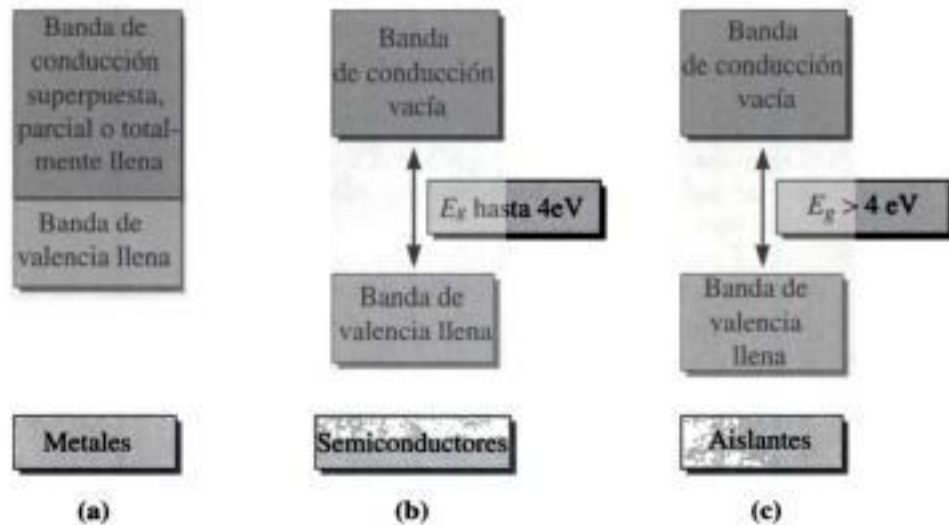


Figura 18-7 Esquema de estructuras de bandas para (a) los metales, (b) los semiconductores y (c) dieléctricos o aislantes. (La temperatura es de 0 K .)

la zona prohibida y llegar a la banda de conducción. En consecuencia, el diamante tiene una conductividad eléctrica inferior a $10^{-18} \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. Otros materiales enlazados de manera covalente o iónica tienen una estructura de banda similar y, al igual que el diamante, se comportan como no conductores de la electricidad. Si se incrementa la temperatura o se aplica un voltaje, se suministra la energía necesaria para que los electrones superen la brecha de energía. Por ejemplo, la conductividad eléctrica del nitrato de boro aumenta desde aproximadamente 10^{-13} a la temperatura ambiente hasta $10^{-4} \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ a 800°C .

Entonces, una distinción importante entre metales y semiconductores es el hecho de que la conductividad de los semiconductores *aumenta* al aumentar la temperatura, ya que más y más electrones pueden alcanzar la banda de conducción desde la banda de valencia. En otras palabras, se libera una cantidad creciente de electrones de los enlaces covalentes en un semiconductor, quedando disponibles para la conducción. Por otra parte, la conductividad de la mayoría de los metales, *disminuye* al aumentar la temperatura. Esto se debe a que el número de electrones ya disponibles empieza a dispersarse más (es decir, al incrementarse la temperatura, se reduce la movilidad).

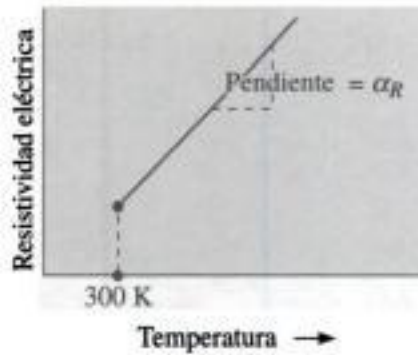


Figura 18-9 Efecto de la temperatura sobre la resistividad eléctrica de un metal con una estructura cristalina perfecta. La pendiente de la curva es el coeficiente de resistividad por temperatura.

donde ρ es la resistividad a cualquier temperatura T , ρ_{RT} es la resistividad a la temperatura ambiente (por ejemplo, 25°C), $\Delta T = (T - T_{RT})$ es la diferencia entre la temperatura de interés y la temperatura ambiente, y α_R es el coeficiente de resistividad por temperatura. La relación entre la resistividad y la temperatura es lineal en un amplio rango de temperaturas (Fig. 18-9). En la tabla 18-3 se dan ejemplos del coeficiente de resistividad por temperatura.[1]

TABLA 18-3 ■ Coeficiente de resistividad por temperatura α_R para metales seleccionados [1]

Metal	Resistividad a la temperatura ambiente (ohm · cm)	Coeficiente de resistividad por temperatura (α_R) (ohm/ohm · °C)
Be	4.0×10^{-6}	0.0250
Mg	4.45×10^{-6}	0.0037
Ca	3.91×10^{-6}	0.0042
Al	2.65×10^{-6}	0.0043
Cr	12.90×10^{-6} (0 °C)	0.0030
Fe	9.71×10^{-6}	0.0065
Co	6.24×10^{-6}	0.0053
Ni	6.84×10^{-6}	0.0069
Cu	1.67×10^{-6}	0.0043
Ag	1.59×10^{-6}	0.0041
Au	2.35×10^{-6}	0.0035
Pd	10.8×10^{-6}	0.0037
W	5.3×10^{-6} (27 °C)	0.0045
Pt	9.85×10^{-6}	0.0039

(Fuente: Reproducido con autorización de Handbook of Electronic Materials, por P.S. Neelakanta, pp. 215-216, tabla 9-1. Copyright © 1995 CRC Press, Boca Ratón, Florida).

EJEMPLO 18-4 Resistividad del cobre puro

Calcule la conductividad eléctrica del cobre puro a (a) 400°C y (b) -100°C .

SOLUCIÓN

La conductividad del cobre puro es de $5.98 \times 10^5 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ y la resistividad del cobre a la temperatura ambiente es de $1.67 \times 10^{-6} \text{ ohm} \cdot \text{cm}$. El coeficiente de resistividad por temperatura es de $0.0068 \text{ ohm} \cdot \text{cm}/^\circ\text{C}$. (Véase la tabla 18-1.)

1. A 400°C :

$$\rho = \rho_{RT}(1 + \alpha_R \Delta T) = (1.67 \times 10^{-6})[1 + 0.0068(400 - 25)]$$

$$\rho = 5.929 \times 10^{-6} \text{ ohm} \cdot \text{cm}$$

$$\sigma = 1/\rho = 1.69 \times 10^5 \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$$

2. A -100°C :

$$\rho = (1.67 \times 10^{-6})[1 + 0.0068(-100 - 25)] = 0.251 \times 10^{-6} \text{ ohm} \cdot \text{cm}$$

$$\sigma = 39.8 \times 10^5 \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$$

Efecto de las imperfecciones a nivel atómico Los defectos reticulares dispersan los electrones, reduciendo la movilidad y la conductividad del metal [Fig. 18-8(c)]. Por ejemplo, el incremento en resistividad debido a átomos en una solución sólida es

$$\rho_d = b(1 - x)x \quad (18-7)$$

donde ρ_d es el incremento en resistividad debido a los defectos, x es la fracción atómica de la impureza o de los átomos de solución sólida presentes, y b es el coeficiente de resistividad de los defectos. De manera similar, las vacancias, las dislocaciones y los bordes de grano reducen la conductividad del metal. Cada imperfección contribuye a un incremento en la resistividad del metal. Por lo que la resistividad total es

$$\rho = \rho_T + \rho_d \quad (18-8)$$

donde ρ_d es igual a la contribución proveniente de todos los defectos. La ecuación 18-8 se conoce como la **regla de Matthiessen**. El efecto de los defectos es *independiente* de la temperatura (Fig. 18-10).

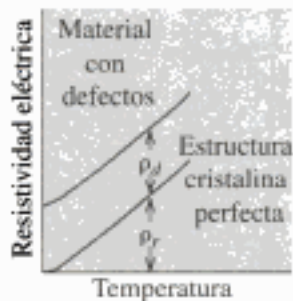


Figura 18-10

La resistividad eléctrica de un metal está compuesta por la contribución de defectos constante ρ_d y la contribución de la temperatura variable ρ_T .

Efecto del procesamiento y del endurecimiento Los mecanismos de endurecimiento y las técnicas de proceso de los metales afectan de distintas maneras las propiedades eléctricas de un metal (tabla 18-4). El endurecimiento por solución sólida *no* es una buena manera de obtener una alta resistencia en metales que se desea tengan elevadas conductividades. Las trayectorias libres medias son muy cortas debido a la distribución aleatoria de los átomos intersticiales o sustitucionales. La figura 18-11 muestra el efecto del zinc y de otros elementos de aleación en la conductividad del cobre; conforme aumenta la cantidad del elemento de aleación, la conductividad se reduce de manera considerable.

El endurecimiento por envejecimiento y por dispersión reducen menos la conductividad que el endurecimiento por solución sólida, ya que entre los precipitados existe una trayectoria libre promedio más larga, comparada con la trayectoria entre defectos puntuales. El endurecimiento por deformación y el control del tamaño de grano tienen incluso menos efecto sobre

18-5 Conductividad de otros materiales

La conductividad eléctrica por lo general es muy baja en la mayoría de los materiales cerámicos y poliméricos. Sin embargo, algunos materiales especiales proporcionan una conducción limitada o incluso buena. En el capítulo 4 vimos cómo puede utilizarse la notación Kröger-Vink para explicar la química de los defectos en los materiales cerámicos. Mediante el uso de dopantes es posible tomar muchos materiales cerámicos (por ejemplo, BaTiO_3 , TiO_2 , ZrO_2) que son normalmente aislantes y convertirlos en óxidos conductores.[9] La conducción en estos materiales puede ocurrir como resultado del movimiento de iones o de electrones y huecos.

Conducción de materiales iónicos La conducción en los materiales iónicos ocurre frecuentemente mediante el movimiento de iones completos, dado que la brecha de energía es demasiado grande para que los electrones entren en la banda de conducción. Por tanto, la mayoría de los materiales iónicos se comportan como aislantes.

En los materiales iónicos la movilidad de los portadores de carga, es decir los iones, es

$$m = \frac{ZqD}{k_B T}, \quad (18-10)$$

donde D es el coeficiente de difusión, k_B es la constante de Boltzmann (tabla 18-2), T es la temperatura absoluta, q es la carga eléctrica (tabla 18-2) y Z es la valencia del ion. La movilidad de los iones es de varios órdenes de magnitud menor que la movilidad de los electrones; de ahí que la conductividad sea muy pequeña:

$$\sigma = n \cdot Z \cdot q \cdot \mu \quad (18-11)$$

Las impurezas y las vacancias aumentan la conductividad; las vacancias son necesarias para la difusión en los tipos sustitucionales de las estructuras cristalinas; las impurezas también pueden difundirse y ayudar a transportar la corriente. Las temperaturas elevadas incrementan la conductividad debido a que aumenta la velocidad de difusión. El siguiente ejemplo ilustra la estimación de la movilidad y de la conductividad en el MgO.

EJEMPLO 18-6 Conducción iónica en el MgO

Suponga que la conductividad eléctrica del MgO está determinada primordialmente por la difusión de los iones Mg^{2+} . Estime la movilidad de estos iones y calcule la conductividad eléctrica del MgO a 1800 °C.

SOLUCIÓN

De la figura 5-9 el coeficiente de difusión de los iones Mg^{2+} en MgO a 1800 °C es $10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$. Para el MgO, $Z = 2/\text{ion}$, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ (de la tabla 18-2), y $T = 2073 \text{ K}$:

$$\mu = \frac{ZqD}{k_B T} = \frac{(2)(1.6 \times 10^{-19})(10^{-10})}{(1.38 \times 10^{-23})(2073)} = 1.12 \times 10^{-9} \text{ C} \cdot \text{cm}^2/\text{J} \cdot \text{s}$$

Dado que la carga en coulombs es equivalente a amperes $\cdot$ segundo, y los joules son equivalentes a Amp $\cdot$ seg $\cdot$ voltios:

$$\mu = 1.12 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$$

El MgO tiene la estructura del NaCl, con cuatro iones de magnesio por celda unitaria. El parámetro de la red cristalina es $3.96 \times 10^{-8} \text{ cm}$, por lo que la cantidad de iones de Mg^{2+} por centímetro cúbico es:

TABLA 18-6 ■ Propiedades de semiconductores de uso común

Semiconductor	Brecha de energía eV	Movilidad de los electrones ($\mu\rho$) $\frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$	Movilidad de los huecos ($\mu\rho$) $\frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$	Constante dieléctrica (K)	Resistividad $\Omega \cdot \text{cm}$	Densidad $\frac{\text{gm}}{\text{cm}^3}$	Temperatura de fusión $^{\circ}\text{C}$
Silicio (Si)	1.11	1 350	480	11.8	2.5×10^5	2.33	1 415
Silicio amorfo (a:Si:H)	1.70	1	10^{-2}	~11.8	10^{10}	~2.30	—
Germanio (Ge)	0.67	3 900	1 900	16.0	43	5.32	936
SiC (α)	2.86	500		10.2	10^{10}	3.21	2 830
Arseniuro de galio (GaAs)	1.43	8 500	400	13.2	4×10^8	5.31	1 238
Diamante	~5.50	1 800	1 500	5.7	$>10^{18}$	3.52	~4 200
α -Sn	0.10	2 000	1 000	—	10^{-4}	5.80	232

amplificadores o dispositivos de almacenamiento de datos. Las propiedades de algunos de los semiconductores de uso común aparecen en la tabla 18-6.

La brecha de energía E_g entre las bandas de valencia y de conducción en los semiconductores es relativamente pequeña (Fig. 18-7). Como resultado, algunos electrones poseen suficiente energía térmica para saltar la brecha y entrar en la banda de conducción. Los electrones excitados dejan atrás niveles de energía no ocupados, es decir huecos, en la banda de valencia. Cuando se mueve un electrón para llenar un hueco, se crea otro hueco en la fuente original del electrón; en consecuencia, los huecos parecen actuar como electrones cargados positivamente y conducen una carga eléctrica. Cuando se aplica un voltaje a este material, los electrones de la banda de conducción se aceleran hacia la terminal positiva, en tanto que los huecos de la banda de valencia se mueven hacia la negativa (Fig. 18-16). Por tanto, se conduce una corriente debida al movimiento tanto de los electrones como de los huecos.

La conductividad está determinada por el número de pares electrón-hueco,

$$\sigma = n \cdot q \cdot \mu_n + p \cdot q \cdot \mu_p \quad (18-12)$$

donde n es la concentración de los electrones en la banda de conducción, p es la concentración de huecos en la banda de valencia, μ_n y μ_p son las movilidades de electrones y de huecos, respectivamente (tabla 18-6). Esta ecuación es igual a la 18-5b.

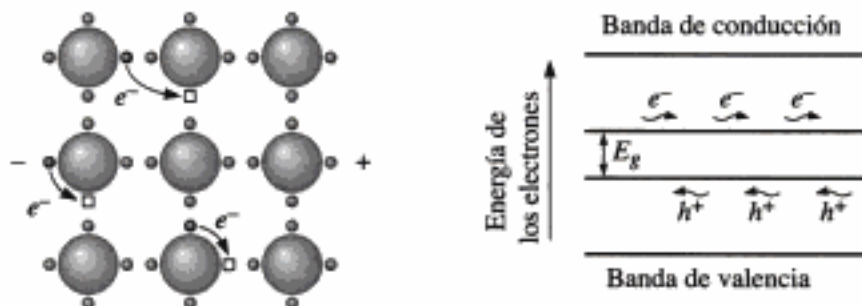


Figura 18-16 Cuando a un semiconductor se le aplica un voltaje, los electrones se mueven a través de la banda de conducción, en tanto que los huecos de electrones se mueven a través de la banda de valencia en la dirección opuesta.

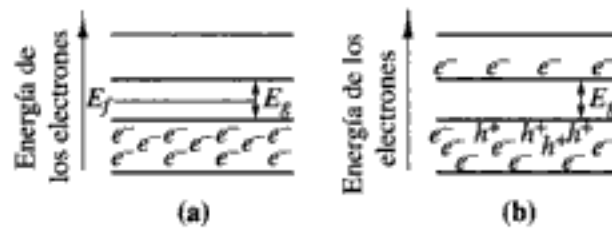


Figura 18-17

Distribución de electrones y de huecos en las bandas de valencia y de conducción (a) al cero absoluto y (b) a una temperatura elevada.

En los semiconductores intrínsecos, para cada electrón de conducción promovido a la banda de conducción, se deja un hueco en la banda de valencia; por tanto:

$$n_i = p_i \quad (18-12a)$$

Así, la conductividad de un semiconductor intrínseco es:

$$\sigma = qn_i(\mu_e + \mu_h) \quad (18-13)$$

En los semiconductores intrínsecos, controlamos la cantidad de portadores de carga y, como consecuencia, la conductividad eléctrica al controlar la temperatura. A una temperatura de cero absoluto, todos los electrones están en la banda de valencia, en tanto que todos los niveles en la banda de conducción están desocupados [Fig. 18-17(a)]. Conforme aumenta la temperatura, existe una mayor probabilidad de que se ocupe un nivel de energía en la banda de conducción (así como una probabilidad igual de que quede desocupado un nivel en la banda de valencia, es decir de que esté presente un hueco) [Fig. 18-17(b)]. El número de electrones en la banda de conducción, que es igual al número de huecos de la banda de valencia, está dado por

$$n = n_i = p_i = n_0 \exp\left(\frac{-E_g}{2k_B T}\right) \quad (18-14a)$$

donde n_0 está relacionada con la densidad de los estados y con las masas efectivas de electrones y de huecos.

$$n_0 = 2 \left(\frac{2\pi k_B T}{h^2} \right)^{3/2} (m_e^* m_h^*)^{3/4} \quad (18-14b)$$

En esta ecuación, k y h son las constantes de Boltzmann y de Planck, y m_e^* y m_h^* son las masas efectivas de electrones y de huecos en el semiconductor, respectivamente. Para el Ge, Si y GaAs, los valores a la temperatura ambiente de n_i son: 2.5×10^{13} , 1.5×10^{10} y 2×10^6 electrones/cm³, respectivamente. El producto $n_i \times p_i$ se conserva constante a cualquier temperatura dada y para cualquier semiconductor dado. Esto nos permite calcular los valores n_i o p_i a diferentes temperaturas.

Las temperaturas más elevadas permiten que más electrones crucen la zona prohibida y, por tanto, la conductividad se incrementa:

$$\sigma = n_0 q (\mu_e + \mu_h) \exp\left(\frac{-E_g}{2k_B T}\right) \quad (18-15)$$

Obsérvese que n y σ son función de la temperatura mediante una ecuación de Arrhenius, $\text{tasa} = A \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$. Conforme aumenta la temperatura, la conductividad de un semiconductor también aumenta porque existen más portadores de carga presentes, en tanto que la conductividad de un metal se reduce debido a la menor movilidad de los portadores de carga. El ejemplo que damos a continuación muestra el cálculo para la concentración de portadores en semiconductores intrínsecos.

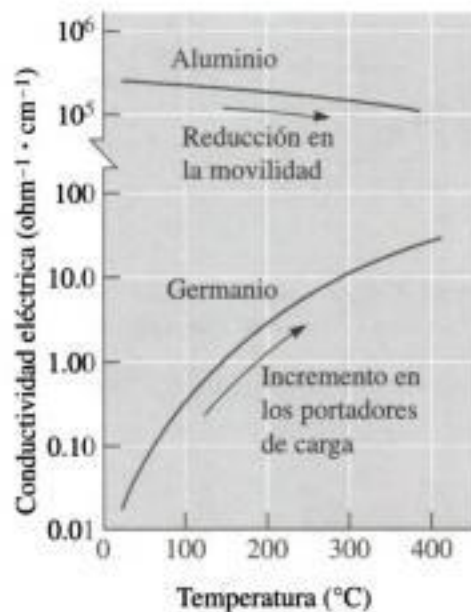


Figura 18-18

Conductividad eléctrica en función de la temperatura de los semiconductores intrínsecos, en comparación con los metales. Obsérvese la ruptura en la escala del eje y.

EJEMPLO 18-7 Concentración de portadores en el Ge intrínseco

Para el germanio a 25°C , estime (a) el número de portadores de carga, (b) la fracción del total de electrones de la banda de valencia que pasan a la banda de conducción y (c) la constante n_i .

SOLUCIÓN

De la tabla 18-6, $\rho = 43 \, \Omega\text{-cm}$, $\therefore \sigma = 0.023 \, \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$

También de la tabla 18-6, $E_g = 0.67 \, \text{eV}$

$$\mu_n = 3900 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}} \quad \mu_p = 1900 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

$$2k_B T = (2)(8.63 \times 10^{-5} \, \text{eV/K})(273 + 25) = 0.0514 \, \text{eV a } T = 25^{\circ}\text{C}$$

1. De la ecuación 18-12:

$$n = \frac{\sigma}{q(\mu_n + \mu_p)} = \frac{0.023}{(1.6 \times 10^{-19})(3900 + 1900)} = 2.5 \times 10^{13} \frac{\text{electrones}}{\text{cm}^3}$$

Existen $2.5 \times 10^{13} \, \text{electrones/cm}^3$ y $2.5 \times 10^{13} \, \text{huecos/cm}^3$ para conducir una carga en el germanio a la temperatura ambiente.

2. El parámetro de la red del germanio cúbico tipo diamante es $5.6575 \times 10^{-8} \, \text{cm}$. El número total de electrones en la banda de valencia del germanio es:

$$\begin{aligned} \text{Total de electrones} &= \frac{(8 \, \text{átomos/celda})(4 \, \text{electrones/átomo})}{(5.6575 \times 10^{-8} \, \text{cm})^3} \\ &= 1.77 \times 10^{23} \end{aligned}$$

$$\text{Fracción excitada} = \frac{2.5 \times 10^{13}}{1.77 \times 10^{23}} = 1.41 \times 10^{-10}$$

3. De la ecuación 18-14(a):

$$n_0 = \frac{n}{\exp(-E_g/2k_B T)} = \frac{2.5 \times 10^{13}}{\exp(-0.67/0.0514)} \\ = 1.14 \times 10^{19} \text{ portadores/cm}^3$$

Semiconductores extrínsecos La dependencia en la temperatura de la conductividad en los semiconductores intrínsecos es casi exponencial, pero esto no resulta útil para aplicaciones prácticas. No podemos controlar con precisión el comportamiento de un semiconductor intrínseco, ya que ligeros cambios en la temperatura pueden modificar significativamente la conductividad. Sin embargo, al agregar de manera intencional una pequeña cantidad de átomos de impureza en el material (método conocido como **dopado**), podemos producir un semiconductor extrínseco. La conductividad de un semiconductor extrínseco depende principalmente del número de átomos de impurezas, es decir, de dopantes y, dentro de un cierto rango de temperaturas, dicha conductividad es independiente de la temperatura. Esta capacidad para tener una conductividad ajustable y al mismo tiempo independiente de la temperatura es la razón por la cual casi siempre utilizamos semiconductores extrínsecos para la fabricación de dispositivos.

Semiconductores del tipo *n* Suponga que agregamos al silicio o al germanio un átomo de impureza, como antimonio, que tiene una valencia igual a cinco. Cuatro de los electrones del átomo de antimonio participan en el proceso de enlaces covalentes, en tanto que el electrón adicional se coloca en un nivel de energía en estado donador justo por debajo de la banda de conducción (Fig. 18-19). Dado que el electrón adicional no está unido fijamente a los átomos, sólo se requiere de un pequeño incremento en la energía, E_d , para que este electrón entre en la banda de conducción. (E_d se define con frecuencia como la diferencia de energía entre la parte superior de la banda de valencia y la banda de donadores. En este caso, el incremento de energía requerido se definiría como $E_g - E_d$.) La brecha de energía que controla la conductividad es ahora igual a E_d en vez de E_g (tabla 18-7). Cuando los electrones donadores entran en la banda de conducción, no se crean huecos correspondientes.

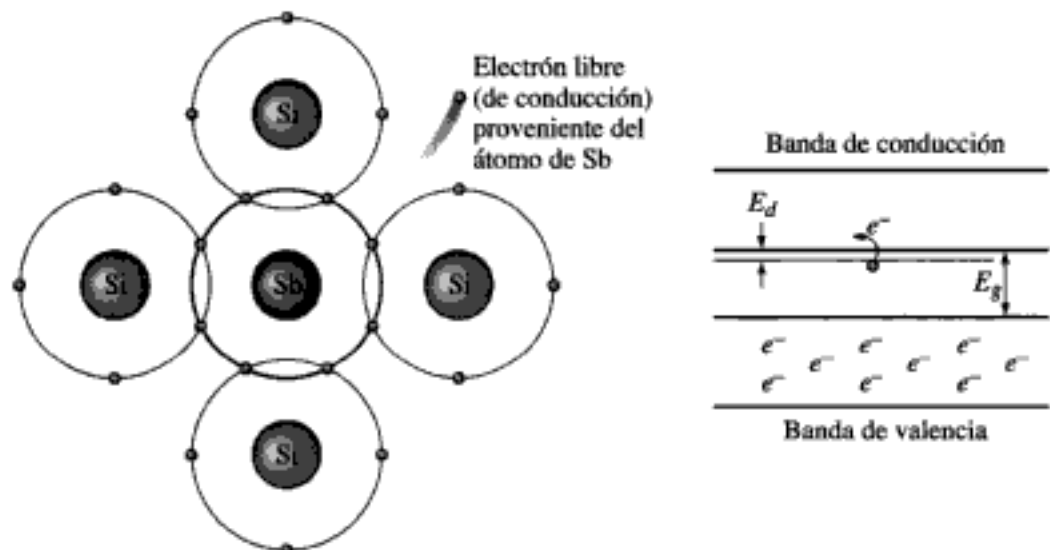


Figura 18-19 Cuando al silicio se le agrega un átomo dopante con una valencia superior a cuatro, se introduce un electrón adicional y se crea un estado donador de energía. Ahora los electrones se excitan con mayor facilidad hacia la banda de conducción.

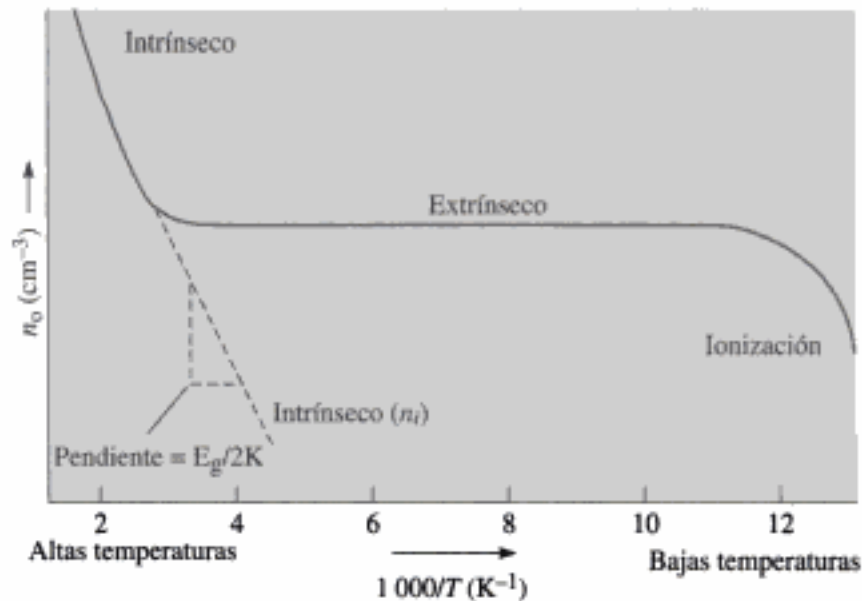


Figura 18-20 Efecto de la temperatura sobre la concentración de portadores de un semiconductor del tipo *n*. A temperaturas bajas, los átomos donadores o aceptantes no están ionizados. Conforme la temperatura se incrementa, se completa el proceso de ionización y la concentración de portadores aumenta hasta un nivel dictado por el grado de dopado. La conductividad entonces se conserva relativamente sin cambio, hasta que la temperatura llega a un nivel tan elevado que los portadores generados térmicamente empiezan a dominar. El efecto de los dopantes se pierde a temperaturas muy elevadas y el semiconductor muestra esencialmente un comportamiento "intrínseco".

encima de la banda de valencia (tabla 18-7). Un electrón necesita ganar una energía de sólo E_a , a fin de crear un hueco en la banda de valencia. El hueco entonces se mueve y transporta la carga. Ahora se ha obtenido un semiconductor del tipo *p* como se ilustra en el siguiente ejemplo.

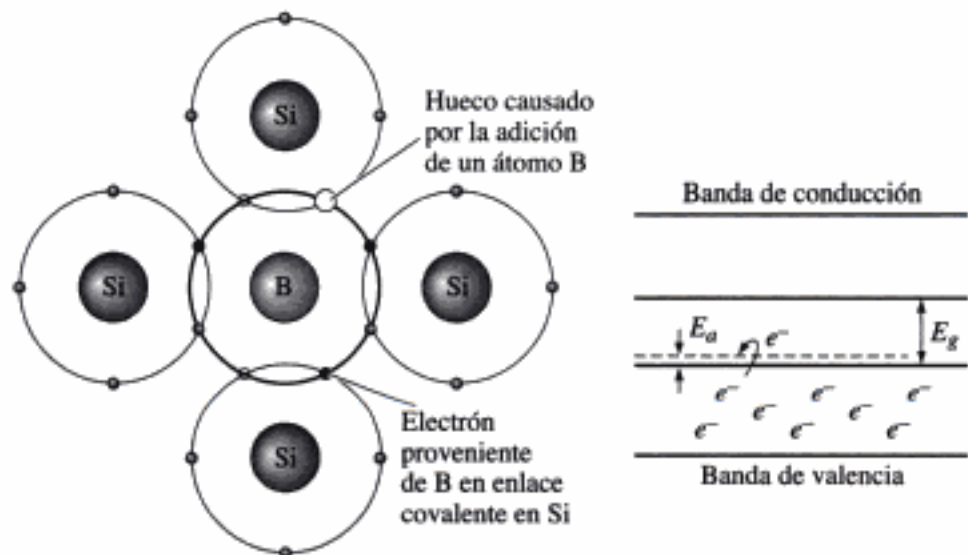


Figura 18-21 Cuando un átomo dopante con una valencia inferior a cuatro se sustituye en la estructura de silicio, se crea un hueco en dicha estructura y aparece un nivel de energía de aceptor justo por encima de la banda de valencia. Para excitar los huecos y ponerlos en movimiento se requiere de poca energía.

EJEMPLO 18-8 *Diseño de un semiconductor*

Diseñe un semiconductor del tipo *p* basado en silicio que proporcione una conductividad constante de todo un rango de temperaturas. Comente sobre el nivel de pureza que se necesita.

SOLUCIÓN

A fin de obtener la conductividad deseada, es necesario dopar el silicio con átomos que tengan una valencia igual a +3, y añadir suficiente dopante para obtener la cantidad requerida de portadores de carga. Si suponemos que el número de portadores intrínsecos es pequeño, entonces

$$\sigma = N_d q \mu_p,$$

donde $\alpha = 100 \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ y $\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$. Si recordamos que el coulomb puede expresarse como amperes-segundo y el voltaje como amperes-ohm, el número de portadores de carga requerido es:

$$N_d = \frac{\sigma}{q \mu_p} = \frac{100}{(1.6 \times 10^{-19})(480)} = 1.30 \times 10^{18} \text{ átomos donadores/cm}^3$$

Comparemos la concentración de átomos donadores en Si con la correspondiente de átomos Si. Supongamos que, como resultado del dopado, la constante de la red de Si se conserva sin cambios:

$$N_d = \frac{\left(\frac{1 \text{ electrón}}{1 \text{ átomo de dopante}} \right) \left(\frac{x \text{ átomos dopantes}}{\text{átomos de Si}} \right) \left(\frac{8 \text{ átomos de Si}}{\text{celda unitaria}} \right)}{(5.4307 \times 10^{-8} \text{ cm})^3}$$

$$x = (1.3 \times 10^{18})(5.4307 \times 10^{-8})^3 / 8 = 26 \times 10^{-6} \frac{\text{átomos dopantes}}{\text{átomos de Si}}$$

o bien 26 átomos dopantes/ 10^6 átomos de Si

Los dopantes posibles son boro, aluminio, galio e indio (capítulo 5). Son esenciales productos químicos de alta pureza, así como recintos limpios para el proceso, ya que son necesarios 26 átomos de dopantes (manzanas) en un millón de átomos de silicio (naranjas).

Muchos otros materiales que normalmente son aislantes (debido a que la brecha de energía es demasiado grande) se pueden convertir en semiconductores mediante el dopado. Ejemplos de lo anterior incluyen al BaTiO_3 , el ZnO , el TiO_2 y muchos otros óxidos. Entonces, el concepto de dopantes del tipo *n* o del tipo *p* no está limitado al Si, Ge, GaAs, etc.; podemos dopar el BaTiO_3 , por ejemplo, y fabricar un BaTiO_3 del tipo *n* o del tipo *p*. Este tipo de materiales resulta útil para muchas aplicaciones de sensores, como son los **termistores**.^[17]

Semiconductores de brecha de energía directa e indirecta En un semiconductor de brecha de energía directa, se puede promover un electrón de la banda de conducción a la banda de valencia sin cambiar el momento del electrón. El GaAs es un ejemplo de semiconductor de brecha de energía directa. Cuando el electrón excitado vuelve a pasar a la banda de valencia, se combinan los electrones y los huecos para producir luz. Entonces



Esto se conoce como **recombinación radiante**. Es por eso que se utilizan materiales de brecha de energía directa, como GaAs y sus soluciones sólidas (por ejemplo, GaAs-AlAs) para la fabricación de diodos emisores de luz (LED) de distintos colores. Se puede sintonizar la

millones de transistores integrados en un área tan pequeña como de 1 cm^2 . La unión p - n se utiliza para manufacturar diodos y otros muchos dispositivos como los transistores, por ejemplo. Desde un punto de vista eléctrico, la unión p - n está conduciendo cuando el lado p está conectado a un voltaje positivo (conocido como **polarización directa** o **positiva**). Si una polarización negativa se le aplica al lado p de una unión p - n (**polarización negativa**), la unión p - n no conduce mucha corriente. Cuando no se aplica polarización, no fluye corriente a través de la unión p - n . La corriente directa hacia delante puede alcanzar hasta unos pocos miliamperes, en tanto que la corriente de polarización inversa no pasa de unos cuantos nanoamperes. En una unión p - n sin polarización se cancelan entre sí las corrientes de difusión y de deriva debidas a movimientos de los electrones y de los huecos (capítulo 5). Bajo una polarización directa o positiva, el ancho de la zona de agotamiento (W) se hace más pequeña (de V_0 a $V_0 - V_f$) y empieza a fluir una cantidad considerable de corriente. Bajo una polarización inversa, el ancho de la zona de agotamiento incrementa la barrera de potencial contra el flujo de corriente (de V_0 a $V_0 + V_r$).

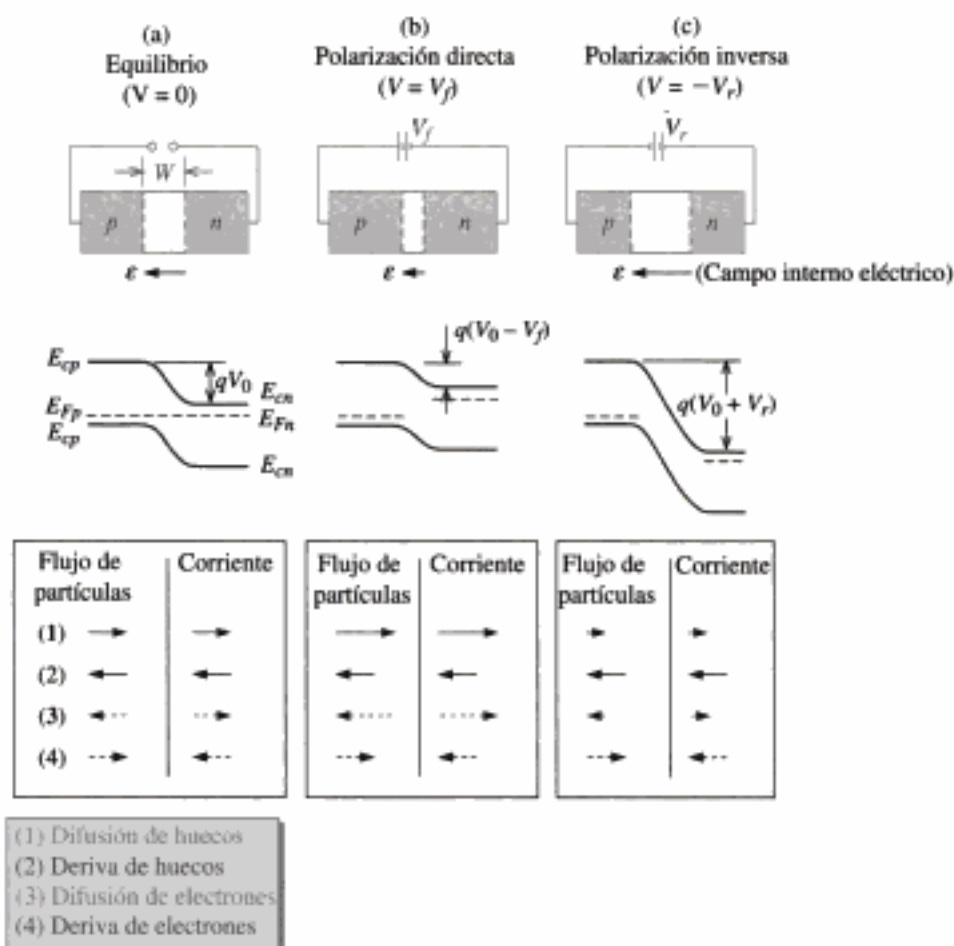


Figura 18-22 Comportamiento de un dispositivo de unión p - n : (a) cuando no se aplica polarización, las corrientes de electrones y de huecos ocasionadas por la deriva y por la difusión se cancelan entre sí sin ninguna corriente neta y se presenta un incremento de potencial V_0 . (b) Una polarización directa hace que la barrera de potencial se reduzca hasta $V_f - V_0$ y la zona de agotamiento se reduce causando el flujo de una corriente. (c) Una polarización inversa hace que la barrera de potencial se incremente a $V_r + V_0$ y fluye muy poca corriente. El campo eléctrico interno que se desarrolla se muestra como E . (Fuente: *De Solid State Electronic Devices*, 3a. ed., por B. G. Streetman, fig. 5-10. Copyright © 2000, Prentice Hall. Reproducido con permiso de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, N.J.)

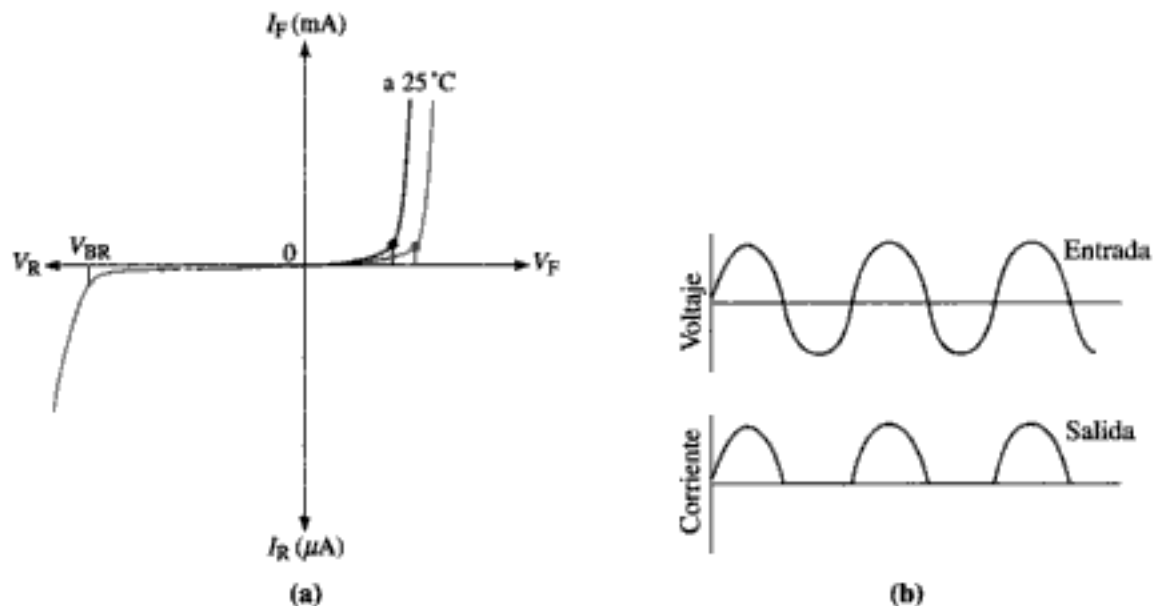


Figura 18-23 (a) Característica corriente-voltaje de una unión $p-n$. Obsérvense las diferentes escalas en los cuadrantes primero y tercero. (b) Si se le aplica una señal alterna, ocurre la rectificación y solamente la mitad de la señal de entrada pasa a través del rectificador. (Fuente: de *Electronic Devices*, 6a. ed., por T. L. Floyd, fig. 1-30. Copyright © 2002, Prentice Hall. Reproducido con permiso de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, N.J.)

$+V_p$) y fluye muy poca corriente (Fig. 18-22). En este diagrama, $\mathcal{E}$ es el campo eléctrico interno, y E_F es el nivel Fermi de energía. Los subíndices v y c se refieren a las bandas de valencia y de conducción, respectivamente. Las corrientes de deriva se conservan sin modificación; sin embargo, las corrientes de difusión resultan afectadas como consecuencia de la polarización (creciente en la polarización directa y decreciente en la polarización inversa).

Las características $V-I$ de una unión $p-n$ aparecen en la figura 18-23(a). Dado que la unión $p-n$ sólo permite flujo de corriente en una dirección, deja pasar únicamente la mitad de una corriente alterna, convirtiendo, por tanto, dicha corriente alterna en corriente directa [Fig. 18-23(b)]. Estas uniones se conocen como *diodos rectificadores*. Normalmente se produce una pequeña corriente de fuga en polarización inversa debido al movimiento de electrones y huecos térmicamente activados. Sin embargo, cuando la polarización inversa se hace demasiado grande, cualesquiera portadores que alcancen a fugarse a través de la barrera aislante de la unión se aceleran mucho, excitando a otros portadores de carga y causando así una corriente importante en dirección opuesta. La ruptura bajo una polarización inversa puede deberse al efecto túnel en los electrones. Esto se conoce como la ruptura Zener, que ocurre en uniones $p-n$ altamente dopadas con anchos reducidos en la zona de agotamiento. Los diodos Zener se utilizan para proteger circuitos eléctricos, pues pueden ser diseñados para que tengan una ruptura intencional a un voltaje dado. Los diodos Zener se utilizan siempre en polarización inversa. Para uniones $p-n$ poco dopadas, la ruptura puede presentarse a través del mecanismo del **voltaje de avalancha**. En esencia, cuando el voltaje aplicado a las uniones $p-n$ es demasiado elevado, se crean pares electrón-hueco por ionización de impacto. Esta ruptura dañará a la unión $p-n$ y normalmente no resulta útil.

Existen dos tipos de transistores (resistores de transferencia) fabricados utilizando uniones $p-n$.

Transistores de unión bipolar Un **transistor** puede utilizarse como interruptor o como amplificador. Un ejemplo es el *transistor de unión bipolar* (BJT, *bipolar junction transistor*), que se utiliza a menudo en las unidades de procesamiento central de las computadoras debido a su rápida respuesta de conmutación. Un transistor de unión bipolar es un emparedado de

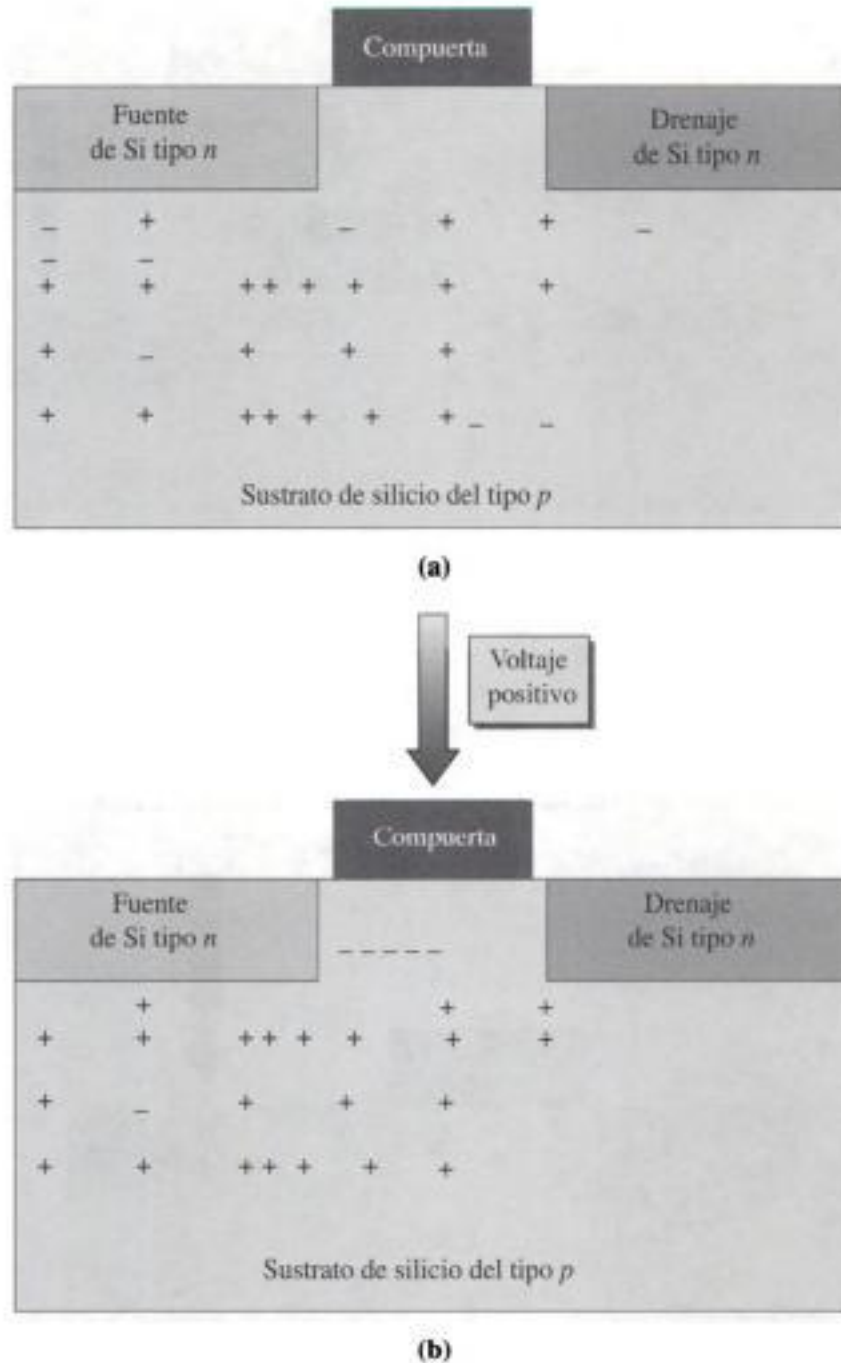


Figura 18-25 Operación de un transistor *n-p-n*. (a) Esquema de un transistor *n-p-n*. Los guiones representan electrones; los signos + representan los huecos. No se muestran en el esquema los electrones en las regiones de la fuente y de la compuerta. (b) La compuerta tiene un voltaje positivo. Los electrones en el sustrato del tipo *p* pasan a la región entre la fuente y el drenaje. (c) Cuando al drenaje se le aplica un voltaje positivo, los electrones de la fuente pasan al drenaje vía la región del canal de electrones entre fuente y drenaje (creada por un voltaje positivo de la compuerta). El transistor está ahora "activo". (d) Cuando desaparece el voltaje de compuerta, el canal de electrones entre fuente y drenaje se interrumpe y el transistor está "inactivo". (Fuente: www.intel.com.)

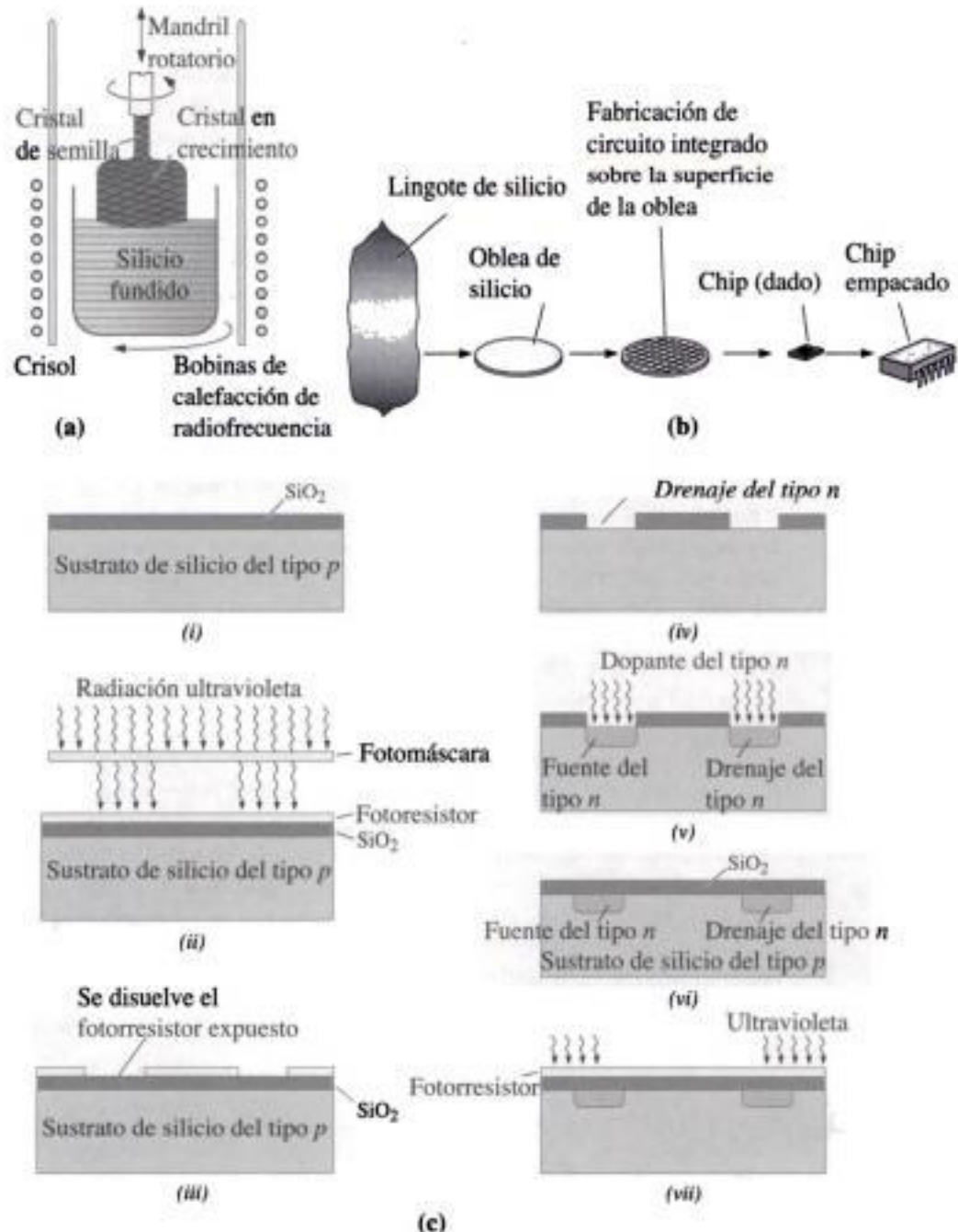


Figura 18-26 (a) Técnica de crecimiento Czochralski para obtener cristales individuales de silicio. (Fuente: De Microchip Fabrication, 3a. ed., por P. VanZant, fig. 3-7, Copyright © 1997 The McGraw-Hill Companies. Reproducido con permiso The McGraw-Hill Companies.) (b) Pasos generales del proceso de los semiconductores. (Fuente: De Fundamentals of Modern Manufacturing, por M. P. Groover, p. 849, fig. 34-3, Copyright © 1996 Prentice Hall.) (c) Producción de un dispositivo semiconductor tipo FET: (i) Se oxida un sustrato de silicio tipo p. (ii) Fitolitografía; es decir, radiación ultravioleta a través de una fotomáscara, expone sólo una porción de la capa fotorresistora. (iii) El fotorresistor expuesto se disuelve. (iv) La sílice expuesta se elimina mediante ataque químico. (v) Se introduce un dopante del tipo n para producir la fuente y el drenaje. (vi) El silicio se vuelve a oxidar. (vii) Se repite la fitolitografía para introducir otros componentes, incluyendo las terminales eléctricas del dispositivo.

debajo de la compuerta hace que esta región sea más conductora, por lo que un potencial elevado entre la fuente y el drenaje permite que los electrones fluyan de la fuente al drenaje, produciendo una señal amplificada (estado activo). Al modificar el voltaje de entrada entre la compuerta y la fuente, cambia el número de electrones en la trayectoria de conducción, cambiando así también la señal de salida. Cuando no hay un voltaje aplicado a la compuerta, no se atraen electrones a la región entre la fuente y el drenaje y no hay flujo de corriente de la fuente al drenaje (estado inactivo).

Los transistores de efecto de campo son por lo general más económicos en su producción que los transistores de unión bipolar. Dado que los FET ocupan menos espacio, se prefieren en los circuitos integrados microelectrónicos, donde se reúnen millones de transistores en un solo chip de silicio.

Además de lo anterior, se preparan muchos otros dispositivos, como, celdas solares, paneles fotovoltaicos, láser, fotodiodos, etc., utilizando distintos semiconductores.

Manufactura y fabricación de dispositivos semiconductores Con el propósito de producir componentes electrónicos que requieran poca energía, que operen con mucha rapidez y, además, sean económicos, los circuitos integrados microelectrónicos formados sobre chips de silicio pueden contener hasta un millón de transistores u otros dispositivos, cada uno de dimensiones inferiores a 10^{-6} cm ($1\ \mu\text{m}$). Para fabricar estos circuitos, se requieren tecnologías especiales. El punto de partida para los dispositivos más comunes es silicio puro monocristalino (Si). Estos cristales se manufacturan por crecimiento utilizando la técnica de crecimiento Czochralski [Fig. 18-26(a)]. [20] Se utiliza un cristal semilla para crecer un monocristal de silicio (con un diámetro de hasta 10 pulg). También se utilizan técnicas Czochralski de zona de flotación y de encapsulado. [16, 20] Se prefieren monocristales, ya que las propiedades eléctricas de los monocristalinos uniformemente dopados y esencialmente libres de dislocaciones están mucho mejor definidas que los de silicio policristalino. Los pasos generales de elaboración del procesamiento de los semiconductores se muestran en la figura 18-26(b).

Los pasos que se describen en la figura 18-26(c) resumen la fabricación de un transistor FET. La difusión y la implantación de iones se utilizan para crear regiones del tipo *p* y del tipo *n* en áreas seleccionadas. Casi todo el procesamiento de los semiconductores se lleva a cabo en recintos limpios, a fin de eliminar la contaminación por partículas en el aire y en los líquidos. Por la misma razón, se utilizan los productos químicos y soluciones de la más alta pureza en el proceso de los semiconductores.

18-8

Aislantes y sus propiedades dieléctricas

En un gran número de aplicaciones eléctricas y electrónicas se requieren materiales para aislar un campo eléctrico de su entorno. Obviamente, los aislantes eléctricos deben tener una conductividad muy baja; es decir, una elevada resistividad, para impedir el flujo de la corriente. Los aislantes también deben poder resistir campos eléctricos intensos. Estos aislantes se producen a partir de materiales cerámicos y poliméricos en los cuales existe una gran brecha de energía entre las bandas de valencia y de conducción. Sin embargo, la elevada resistividad eléctrica de estos materiales no siempre es suficiente. A voltajes elevados, puede ocurrir una ruptura catastrófica del aislante, como ocurre en los diodos *p-n* cuando se les aplica una polarización inversa elevada, y fluiría la corriente. Con el propósito de seleccionar correctamente un material aislante, debemos comprender la forma en que el material almacena a la vez que conduce las cargas eléctricas. Como aislantes se utilizan porcelana, alúmina, cordierita, mica y algunos vidrios y plásticos. La resistividad de la mayoría de ellos es $>10^{14}\ \Omega\text{-cm}$ y los campos eléctricos de ruptura son de ~ 5 a $10\ \text{kV/mm}$. [21]

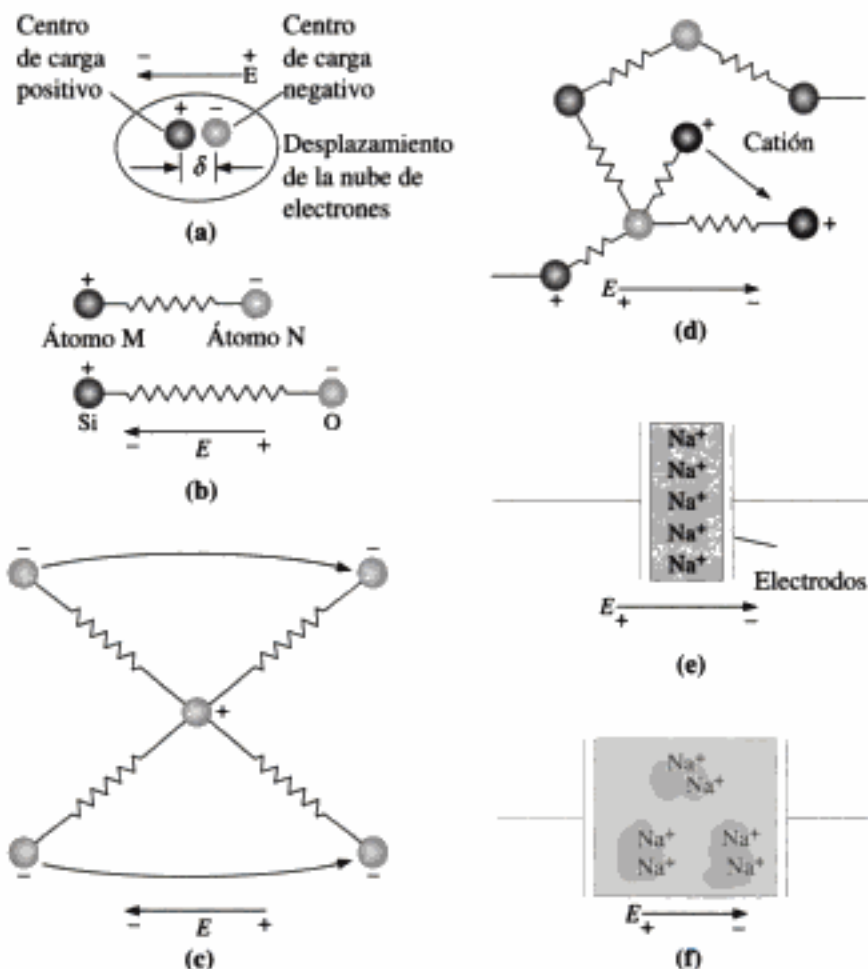


Figura 18-27 Mecanismo de polarización en los materiales: (a) electrónica, (b) atómica o iónica, (c) bipolar de alta frecuencia o de orientación (presente en los materiales ferroeléctricos), (d) bipolar de baja frecuencia (presente en materiales dieléctricos lineales y en los vidrios), (e) carga espacial interfacial en los electrodos y (f) carga espacial interfacial en heterogeneidades, como límites de grano, por ejemplo. (Fuente: *De Principles of Electronic Ceramics*, L. L. Hench y J. K. West, p. 188, fig. 5-2, Copyright © 1990 de Wiley Interscience, reproducido con permiso. Este material se utiliza con permiso de John Wiley & Sons, Inc.)

los átomos. La separación de las cargas, el núcleo y la nube de electrones, crean un momento bipolar [Fig. 18-27(a)]. Este mecanismo puede resistir las frecuencias eléctricas más elevadas ($\sim 10^{15}$ Hz), ya que una nube de electrones puede ser desplazada con velocidad, de ida y vuelta, conforme se conmuta el campo eléctrico. Los átomos más grandes y los iones tienen una capacidad de polarización electrónica más elevada (tendencia a la polarización), dado que la nube de electrones está más lejos del núcleo y está menos sujeta. Este mecanismo de polarización está vinculado también íntimamente con el índice de refracción de los materiales, puesto que la luz es una onda electromagnética donde el campo eléctrico oscila a una frecuencia muy elevada ($\sim 10^{14} - 10^{16}$ Hz). Cuanto más elevada sea la capacidad de polarización electrónica, más alto será el índice de refracción. Utilizamos este mecanismo en la fabricación del "cristal de plomo", mismo que realmente es un vidrio amorfo que contiene hasta 30% de PbO . Los grandes iones de plomo (Pb^{+2}) son muy polarizables, debido a mecanismos de polarización electrónica, y proporcionan un índice de refracción elevado cuando existen concentraciones lo suficientemente altas de óxido de plomo en el vidrio.

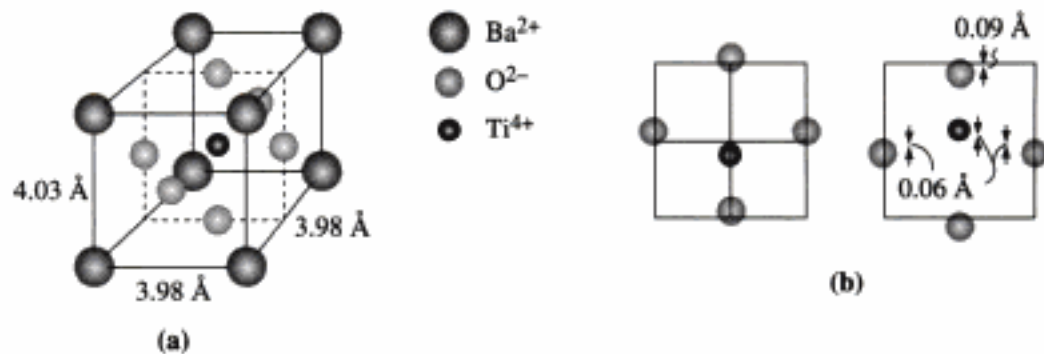


Figura 18-28 (a) Los iones de oxígeno se encuentran en los centros de las caras; los iones Ba²⁺, en las esquinas del cubo; los iones Ti⁴⁺ aparecen en el centro del cubo en el BaTiO₃. (b) En el BaTiO₃ tetragonal, el Ti⁴⁺ está descentrado y la celda unitaria tiene una polarización neta.

y ciertos vidrios que contienen Li₂O o Na₂O). Cuando el material se somete a un campo magnético, la carga se acumula en los bordes de grano o cerca de los electrodos. Este tipo de polarización no es un factor de importancia en la mayoría de los materiales dieléctricos comunes utilizados en los capacitores y en otras aplicaciones.

Dependencia de la frecuencia y la temperatura sobre la constante dieléctrica y las pérdidas dieléctricas De la física elemental, se sabe que la capacitancia (C) está dada por:

$$C = Q/A \quad (18-18)$$

donde Q es la carga en las placas y A es el área de las mismas (Fig. 18-29). Cuando el material sufre de polarización, puede fijar una cierta cantidad de carga sobre la superficie del material. Cuanto mayor sea la polarización, mayor será la carga fijada en la superficie y más elevada la constante dieléctrica (k) del material. Si llenamos el espacio entre las placas paralelas (área A separada por una distancia t) con un material, entonces la constante dieléctrica (k) o la permisividad relativa ϵ_r , está dada por:

$$C = \frac{k\epsilon_0 A}{t} \quad (18-19)$$

La constante ϵ_0 es la **permisividad** de un vacío y es igual a 8.85×10^{-12} F/m. Como se observó con anterioridad, k es una medida de la capacidad de un material para almacenar una carga eléctrica.

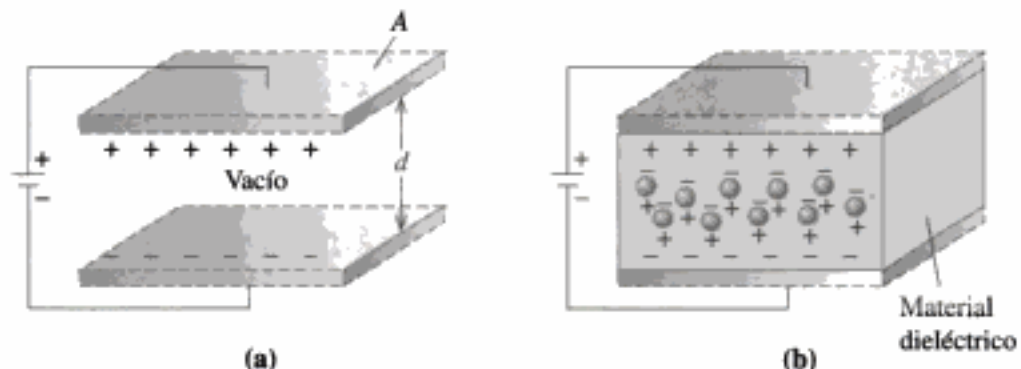


Figura 18-29 En las placas del conductor al vacío se puede almacenar una carga (a). Sin embargo, cuando se coloca un material dieléctrico en las placas (b), éste se polariza y se puede almacenar una mayor carga.

TABLA 18-8 ■ Propiedades de materiales dieléctricos seleccionados

Material	Constante dieléctrica		Resistencia dieléctrica (10 ⁶ V/m)	tan δ (a 10 ⁶ Hz)	Resistividad (ohm · cm)
	(a 60 Hz)	(a 10 ⁶ Hz)			
Poliétileno	2.3	2.3	20	0.00010	>10 ¹⁶
Teflón	2.1	2.1	20	0.00007	10 ¹⁶
Poliestireno	2.5	2.5	20	0.00020	10 ¹⁶
PVC	3.5	3.2	40	0.05000	10 ¹²
Nylon	4.0	3.6	20	0.04000	10 ¹⁵
Hule	4.0	3.2	24		
Fenólicos	7.0	4.9	12	0.05000	10 ¹²
Resina epóxica	4.0	3.6	18		10 ¹⁵
Parafina		2.3	10		10 ¹³ –10 ¹⁹
Sílice fundido	3.8	3.8	10	0.00004	10 ¹¹ –10 ¹²
Vidrio de sosa y cal	7.0	7.0	10	0.00900	10 ¹⁶
Al ₂ O ₃	9.0	6.5	6	0.00100	10 ¹¹ –10 ¹³
TiO ₂		14–110	8	0.00020	10 ¹³ –10 ¹⁸
Mica		7.0	40		10 ¹³
BaTiO ₃		2 000–5 000	12	~0.0001	10 ⁸ –10 ¹⁵
Agua		78.3			10 ¹⁴

elevada, las especies cargadas no pueden seguir el ritmo del campo eléctrico. Ésta es la razón por la cual las pérdidas dieléctricas muestran un pico o una resonancia en cada uno de los mecanismos de polarización. En materiales reales existe un surtido de enlaces (por ejemplo, Si-O, Al-O, Na-O, etc., en un vidrio de silicatos). Por lo tanto, incluso para el mismo mecanismo de polarización, estos picos se aplanan, ya que muchos de ellos ocurren a distintas frecuencias. En la tabla 18-8 se muestran las propiedades dieléctricas de algunos materiales.

En el caso del aislamiento eléctrico (por ejemplo, bujías, cables, etc.), es importante la **resistencia dieléctrica** (es decir, el valor del campo eléctrico que puede resistir antes de la ruptura).

Dieléctricos lineales y no lineales La constante dieléctrica, como es de esperarse, es una función de la polarización que se puede alcanzar en el material. Podemos mostrar que la polarización dieléctrica que se puede inducir en un material depende del campo eléctrico aplicado (E) y de la constante dieléctrica (k).

$$P = (k - 1)\epsilon_0 E \text{ (para dieléctricos lineales)} \quad (18-20)$$

donde E es la resistencia del campo eléctrico (V/m). Para aquellos materiales que se polarizan con facilidad, tanto la constante dieléctrica y la capacitancia son grandes y, a su vez, se puede almacenar una gran cantidad de carga. La ecuación 18-20 sugiere que la polarización aumenta, por lo menos hasta que se alineen todos los dipolos, conforme se incrementa el voltaje (expresado por la resistencia del campo eléctrico). La cantidad $(k - 1)$ se conoce como la susceptibilidad dieléctrica (χ). La constante dieléctrica del vacío es igual a 1 o, lo que es lo mismo, su susceptibilidad dieléctrica es cero. Esto tiene sentido, dado que en el vacío no existen ni átomos ni moléculas.

En los **dieléctricos lineales**, P está linealmente relacionada con E y k es constante. Esto es similar a la manera en que el esfuerzo y la deformación están linealmente relacionados con los sólidos elásticos (capítulo 6). En los dieléctricos lineales, la k o la χ , se conservan constantes al cambiar E . En los materiales polares, como el BaTiO₃, la constante dieléctrica cambia en función de E y, por tanto, la ecuación 18-20 no es utilizable. Estos materiales, en los cuales P y E no están relacionados por una línea recta, se conocen como **dieléctricos no lineales**, es decir ferroeléctricos. Estos materiales son similares a los elastómeros, ya que el esfuerzo y la deformación no están linealmente relacionados y, por lo tanto, no se pueden definir como un valor único del modelo de Young (capítulo 6).

18-10 Electrostricción, piezoelectricidad, piroelectricidad y ferroelectricidad

Cuando cualquier material sufre una polarización, se desplazan sus nubes de iones y de electrones, causando el desarrollo de una deformación mecánica en el material. Este efecto puede verse en todos los materiales sujetos a un campo eléctrico y se conoce como *electrostricción*.

La deformación (x) generada al utilizar un campo eléctrico (E) está dada por:

$$x = \xi E^2 \quad (18-21)$$

El término ξ representa el coeficiente de electrostricción, y E , la magnitud del campo eléctrico. De las 32 clases totales formadas por sistemas cristalinos triclinicos, monoclinicos, ortorrómbicos y tetragonales, 20 tienen un centro de simetría. Esto significa que, si aplicamos un esfuerzo mecánico, no existirá un momento bipolar generado, ya que los movimientos iónicos son simétricos. De los 21 que quedan, 20 grupos puntuales, que carecen de centro de simetría, exhiben el desarrollo de polarización dieléctrica cuando están sujetos a un esfuerzo. Estos materiales se conocen como materiales *piezoeléctricos*. (La palabra *piezo* significa presión.) Estos materiales desarrollan un voltaje cuando se deforman. Este desarrollo de voltaje debido a la aplicación de un esfuerzo se conoce como **efecto directo** o **efecto piezoeléctrico motor** (Fig. 18-31). Este efecto nos ayuda a fabricar dispositivos como encendedores de chispa, que a menudo se fabrican utilizando titanato de plomo zirconio (PZT, de *lead zirconium titanate*). Este efecto también se usa, por ejemplo, en la detección de submarinos y de otros objetos bajo el agua.

A la inversa, cuando se le aplica un voltaje eléctrico, un material piezoeléctrico muestra el desarrollo de una deformación. Esto se conoce como el **efecto inverso** o **efecto piezoeléctrico generador**. Este efecto se utiliza en la fabricación de accionadores. Este movimiento se puede usar, por ejemplo, para generar ondas de ultrasonido que se utilizan en la imagenología médica, además de aplicaciones tales como en limpiadores y cepillos dentales ultrasónicos. La energía sonora también se puede crear utilizando materiales piezoeléctricos para la fabricación de los "tweeter", o altoparlantes para agudos, que se encuentran en la mayoría de aparatos de sonido. Además del $\text{Pb}_{1-x}\text{Zr}_x\text{TiO}_3$ (PZT), otros materiales piezoeléctricos incluyen el SiO_2 (para la fabricación de osciladores de cristal de cuarzo), ZnO y fluoruro de polivinilideno (PVDF). Muchos materiales presentes en la naturaleza, como el hueso y la seda, también son piezoeléctricos.[22]

La constante " d " de un material piezoeléctrico se define como la relación de la deformación con el campo eléctrico.

$$\varepsilon = d \cdot E \quad (18-22a)$$

La constante " g " de un material piezoeléctrico se define como la relación entre el voltaje generado y el esfuerzo aplicado:

$$\varepsilon = g \cdot X \quad (18-22b)$$

En estas ecuaciones, E es el campo eléctrico (V/m), X es el esfuerzo aplicado (Pa), ε es la deformación y d es el coeficiente piezoeléctrico.

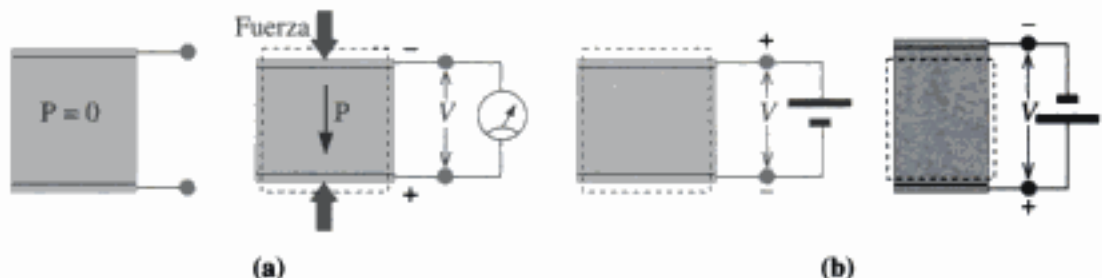


Figura 18-31 Efecto piezoeléctrico (a) directo e (b) inverso. En el efecto piezoeléctrico directo, un esfuerzo aplicado causa la aparición de un voltaje. En el efecto inverso (b), un voltaje aplicado genera el desarrollo de un esfuerzo.

TABLA 18-9 ■ Coeficientes piezoeléctricos d y g para materiales seleccionados

Material	Coeficiente d (pC/N)	Coeficiente g (mV/N)
Cuarzo (SiO_2)	2.3	50×10^{-3}
BaTiO_3^*	190	12×10^{-3}
PZT*	268 a 480	12×10^{-3} a 35×10^{-3}
$\text{PbNb}_2\text{O}_6^*$	80	
PbTiO_3	47	
LiNbO_3	6	
LiTaO_3	5.7	

* Se supone que los ejes del esfuerzo y de la polarización están en la misma dirección.

Los coeficientes piezoeléctricos d y g están relacionados entre sí en función de la constante dieléctrica como sigue:

$$g = \frac{d}{k\epsilon_0} \quad (18-23)$$

donde k es la constante dieléctrica y ϵ_0 es la permisividad del espacio libre (8.85×10^{-12} F/m). La tabla 18-9 proporciona valores típicos para los coeficientes d y g .

El siguiente ejemplo ilustra el diseño de un encendedor de chispa.

EJEMPLO 18-11 Diseño de un encendedor de chispa

Un encendedor de chispa PZT se fabrica utilizando un disco de 5 mm de diámetro y 20 mm de altura. Calcule el voltaje generado si el coeficiente g para el PZT utilizado es igual a $35 \times 10^{-3} \frac{\text{V} \cdot \text{m}}{\text{N}}$. Suponga que a la cara circular se le aplica una fuerza de compresión de 10 000 N.

SOLUCIÓN

El coeficiente g se puede definir como sigue:

$$g = \frac{E \left(\frac{\text{V}}{\text{m}} \right)}{X \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right)}$$

En esta ecuación, X es el esfuerzo aplicado, E es el campo eléctrico generado.

$$\text{El esfuerzo en este caso} = \frac{10\,000 \text{ N}}{\left(\frac{\pi}{4} \right) (5 \times 10^{-2} \text{ m})^2} = 0.0509 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

Por tanto, el campo eléctrico E generado = $g \cdot X = (0.0509 \times 10^8 \text{ N/m}^2)$

$$\left(35 \times 10^{-3} \frac{\text{V} \cdot \text{m}}{\text{N}} \right) = 1.782 \times 10^5 \text{ V/m.}$$

Este campo aparece a través de una altura (H) de 20 mm. El voltaje (V) generado será:

$$\begin{aligned} V &= E \times H = (1.782 \times 10^5 \text{ V/m})(20 \times 10^{-3} \text{ m}) \\ &= 35.65 \times 10^2 = 3\,565 \text{ Volts.} \end{aligned}$$

Este voltaje finalmente aparece entre las terminales a través de un pequeño espacio de aire (~ 0.5 mm) y crea una pequeña chispa ¡que puede encender el asador de carne!

Una permeabilidad relativa significa que el material amplifica el efecto del campo magnético. Entonces, la permeabilidad relativa tiene la misma importancia que la conductividad en los dieléctricos. Un material con una permeabilidad magnética más elevada (por ejemplo, el hierro) acepta el flujo magnético más fácilmente. Posteriormente veremos que la permeabilidad

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (19-5)$$

tiva μ_r , donde:

Podemos describir la influencia del material magnético mediante la permeabilidad relativa μ_r . Si $\mu_r > 1$, el material magnético amplifica el campo magnético. Sin embargo, si los momentos magnéticos se oponen al campo, entonces $\mu_r < 1$. Pueden efectuarse trabajos, y se amplifica el campo magnético. Si los momentos magnéticos re-

$$B = \mu H, \quad (19-4)$$

interactúan en el campo. La densidad de flujo es ahora tico queda determinada por la forma en que los dipolos magnéticos inducidos y permanentes Cuando colocamos un material dentro del campo magnético, la densidad del flujo magnético como henry/m).

(también conocido como weber/m²) y μ_0 es igual a $4\pi \times 10^{-7}$ weber/A · m (también conocido como henry/m). En un conjunto alterno de unidades, H está en A/m, B está en tesla será igual a 1 gauss/oerst. Si H se expresa en oerst, entonces B estará en gauss y μ_0 meabilidad magnética del vacío. Si H es el campo magnético y μ_0 es una constante conocida como permeabilidad magnética del vacío, entonces $B = \mu_0 H$.

$$B = \mu_0 H \quad (19-3)$$

relacionado con el campo aplicado mediante El número de líneas de flujo, conocidas como densidad de flujo o como inductancia B , está Cuando un campo magnético se aplica en un vacío, se inducen líneas de flujo magnético. $4\pi \times 10^{-7}$ (véase la tabla 19-2).

unidad alterna para el campo magnético es el oerst, que se obtiene multiplicando A/m × (A). Por lo tanto, las unidades de H son entonces amper · vueltas/m, o simplemente A/m. Una donde n es el número de espiras o vueltas, l es la longitud de la bobina (m), e I es la corriente

$$H = \frac{nI}{l} \quad (19-2)$$

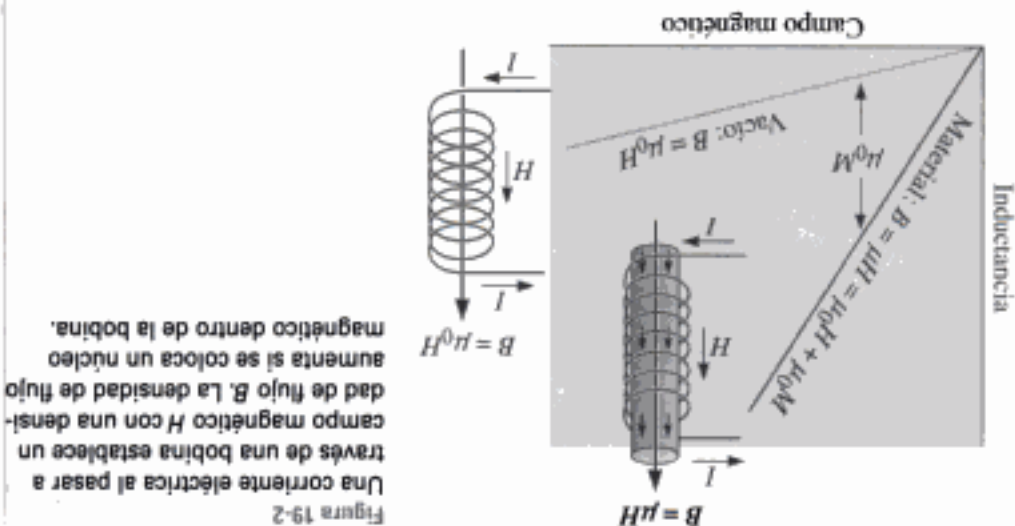


Figura 19-2

Una corriente eléctrica al pasar a través de una bobina establece un campo magnético H con una densidad de flujo B . La densidad de flujo aumenta si se coloca un núcleo magnético dentro de la bobina.

- 18-47 En las propiedades mecánicas, el módulo de elasticidad representa la energía elástica almacenada, y la disipación viscosa, la energía mecánica perdida en la deformación. ¿Cuál es la analogía eléctrica de lo anterior?
- 18-48 Calcule el desplazamiento de los electrones o de los iones para las siguientes condiciones:
- polarización electrónica en el níquel con valor de $2 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$,
 - polarización electrónica en el aluminio con valor de $2 \times 10^{-8} \text{ C/m}^2$,
 - polarización iónica en el NaCl con valor de $4.3 \times 10^{-8} \text{ C/m}^2$ y
 - polarización iónica en el ZnS con valor de $5 \times 10^{-8} \text{ C/m}^2$.
- 18-49 Se utiliza un material dieléctrico de alúmina de 2 mm de espesor en un circuito de 60 Hz. Calcule el voltaje requerido para producir una polarización de $5 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$.
- 18-50 Suponga que es posible producir una polarización de $5 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2$ en un cubo de titanato de bario de 5 mm por lado. ¿Cuál es el voltaje producido?
- 18-51 Calcule el espesor de polietileno que se necesita para almacenar sin ruptura la carga máxima en un circuito de 24000 V.
- 18-52 ¿Qué mecanismo de polarización estará presente en a) la alúmina, b) el cobre, c) el silicio y d) el titanato de bario?
- 18-53 ¿Qué es el cristal de plomo? ¿Por qué tiene un índice elevado de refracción? ¿Es éste un material cristalino?

Sección 18-10 Electrostricción, piezoelectricidad, piroelectricidad y ferroelectricidad

- 18-54 Defina los siguientes términos: electrostricción, piezoelectricidad (defina sus efectos directos e inversos), piroelectricidad y ferroelectricidad.
- 18-55 ¿Qué es un dominio ferroeléctrico? Esboce y explique la variación de la constante dieléctrica del titanato de bario en función de la temperatura.
- 18-56 ¿Por qué no es el BaTiO₃ puro adecuado para la fabricación de capacitores?
- 18-57 Calcule la capacitancia de un capacitor de capas paralelas con cinco capas de mica, siendo cada una de éstas de $1 \times 2 \times 0.005 \text{ cm}$.
- 18-58 Debe diseñarse un capacitor multicapas utilizando una formulación ferroeléctrica relajante basada en el niobato de plomo magnesio (PMN). La constante dieléctrica aparente del material es igual a 20 000. Calcule la capacitancia de un capacitor de multicapas formado por 10 capas conectadas en paralelo utilizando electrodos de Ni. Los costados del capacitor son $10 \times 10 \text{ mm}$ y el espesor de cada capa es igual a $20 \mu\text{m}$.
- 18-59 ¿Cuál es la razón por la cual la constante dieléctrica de la mayoría de los materiales disminuye de valor al incrementar la frecuencia eléctrica?
- 18-60 Determine el número de hojas de Al₂O₃, cada una de ellas de $1.5 \times 1.5 \times 0.001 \text{ cm}$, que se requieren para obtener una capacitancia de $0.0142 \mu\text{F}$ en un capacitor de placas paralelas de 10^6 Hz .
- 18-61 Desearíamos construir un dispositivo de titanato de bario con un diámetro de 0.1 pulg que producirá un voltaje de 250 V cuando se le aplica una fuerza de 5 lb. ¿Cuál sería el espesor de este dispositivo?
- 18-62 Se aplica una fuerza de 20 lb en la cara de un cristal de cuarzo de $0.5 \times 0.5 \times 0.1 \text{ cm}$. Determine el voltaje producido por esta fuerza. El módulo de elasticidad del cuarzo es $10.4 \times 10^6 \text{ psi}$.
- 18-63 Determine la deformación que se produce al aplicar una señal de 300 V a una oblea de titanato de bario de $0.2 \times 0.2 \times 0.01 \text{ cm}$ de espesor.
- 18-64 La figura 18-35 muestra los ciclos de histéresis de dos materiales ferroeléctricos. Determine el voltaje requerido para eliminar la polarización en un dieléctrico de 0.1 cm de espesor hecho con el material A.
- 18-65 De la figura 18-35, determine el espesor de un dieléctrico hecho del material B si se requieren 10 V para eliminar la polarización.
- 18-66 Utilizando la figura 18-35, ¿cuál es el campo eléctrico requerido para producir una polarización de $8 \times 10^{-8} \text{ C/m}^2$ en el material A, y cuál es la constante dieléctrica a esta polarización?
- 18-67 A un material B de la figura 18-35 se le aplica un campo eléctrico de 2500 V/m . Determine la polarización y la constante dieléctrica a este campo eléctrico.

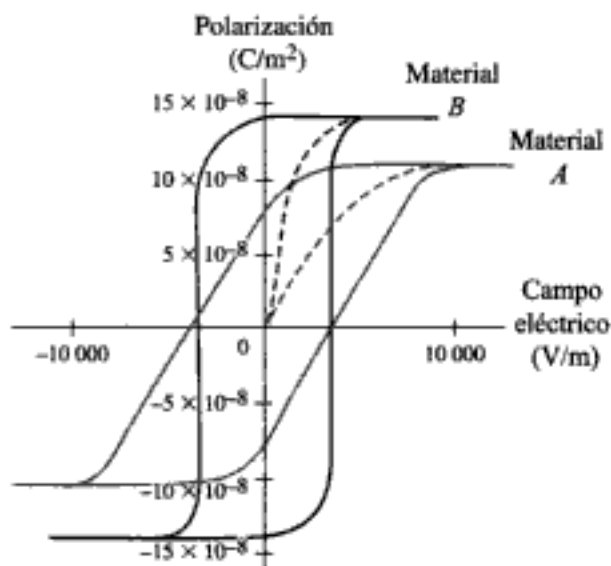


Figura 18-35 Ciclos de histéresis de materiales ferroeléctricos (para los problemas 18-64 y 18-67).

Examinemos la relación entre el campo magnético y la magnetización. La figura 19-2 ilustra una bobina con n espiras. Cuando se hace pasar una corriente eléctrica a través de la bobina, se produce un campo magnético H ; la intensidad del campo está dada por:

Aquellos materiales en los cuales los momentos magnéticos de los distintos átomos o iones no se cancelan en su totalidad se conocen como materiales ferromagnéticos. Analizaremos estos materiales en una sección posterior.

de los momentos magnéticos en átomos o en iones se conocen como materiales antiferromagnéticos. Aquellos materiales en los que existe una total cancelación que el momento neto es igual a cero. Aquellos materiales en los que existen en las esquinas, por lo en el centro de la celda unitaria están en oposición a los de los átomos en las esquinas, por lo En ciertos materiales, como en el cromo BCC (Cr), los momentos magnéticos de los átomos materiales se conocen como materiales ferromagnéticos.

Fe, Ni y Co, los momentos magnéticos de los átomos se orientan en una sola dirección; estos produciendo una amplificación desahle del efecto del campo magnético. En el caso del dipolo de un átomo influye sobre los átomos circundantes con la misma orientación bipolar, hierro (Fe), y cobalto (Co) sufren una interacción de intercambio, por lo que la orientación del momentos magnéticos de los átomos es igual a cero. Sin embargo, los átomos en el níquel (Ni), los elementos de transición (por ejemplo, el Cu, Ti) reaccionan de manera tal que la suma de los bipolos magnéticos, representados por cada átomo, reaccionan ante el campo. La mayoría de La respuesta del átomo a un campo magnético aplicado depende de la forma en que los magnético de un electrón); sin embargo, los cristales de FeCl_2 no son magnéticos.

Por ejemplo, el ion Fe^{2+} tiene un momento magnético neto igual a $4\mu_B$ (4 veces el momento cuyos átomos tienen un momento magnético neto no exhiben un comportamiento magnético. Entonces, un cierto número de materiales formados de elementos bres, pero cuando los átomos forman parte de materiales cristalinos, esos momentos se ven En muchos elementos, estos momentos magnéticos existen para átomos individuales li-

magnético. Cada átomo se comporta como un dipolo. Los electrones en el nivel 3d de los elementos de transición no entran por pares en las capas. En cambio, como en el manganeso, los primeros cinco electrones tienen el mismo giro. Sólo cuando la mitad del nivel 3d está lleno, se forman pares con giros opuestos. Por tanto, cada átomo en un metal de transición tiene un momento magnético permanente, relacionado con el número de electrones no apareados.

TABLA 19-1 ■ Giros de los electrones del nivel 3d en los metales de transición, incluyendo flechas que indican la dirección del giro

Metal	3d	4s
Sc	↓	↓↑
Ti	↓	↓↑
V	↓	↓↑
Cr	↓	↓
Mn	↓	↓
Fe	↓	↓
Co	↓	↓
Ni	↓	↓
Cu	↓	↓

también se utilizan para unir moléculas, celdas y proteínas de ADN. Ésta es la base de las técnicas de separación magnética que se utilizan en bioingeniería y en la secuenciación del ADN. Los materiales magnéticos de más amplio uso se basan en metales y aleaciones ferromagnéticas, como son el hierro, el níquel y el cobalto, o bien de materiales cerámicos ferrimagnéticos, incluyendo varias ferritas y granates. Las aleaciones de Fe-Nd-B así como Sm-Co producen materiales magnéticos "permanentes" muy poderosos, que se utilizan en una amplia diversidad de aplicaciones. Los materiales magnéticos se utilizan en muchos sensores y accionadores; algunos materiales, conocidos como materiales magnetostrictivos, desarrollan una deformación al ser sujetos a un campo magnético.

El comportamiento magnético queda determinado en primer término por la estructura

electrónica de un material, que crea dipolos magnéticos. Las interacciones entre dichos dipolos determinan el tipo de comportamiento magnético observado. Este comportamiento magnético puede ser controlado en función de la composición, microestructura y por el proceso de los materiales básicos. En este capítulo, veremos las bases fundamentales de las respuestas de ciertos materiales en presencia de campos magnéticos. También examinaremos las propiedades y las aplicaciones de diferentes tipos de materiales magnéticos. Gran parte de la terminología que utilizaremos al describir los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos es similar a la utilizada para los materiales ferroeléctricos analizados en el capítulo 18.

19-1

Clasificación de los materiales magnéticos

Estrictamente hablando, no existe ningún material "no magnético". En este mundo, todos los materiales están formados por átomos; los átomos, a su vez, están formados por electrones que giran a su alrededor igual que un ciclo portador de corriente que genera un campo magnético. Así, todo material responde a un campo magnético. La escala con la cual se presenta esta respuesta de electrones y de átomos en un material determina si éste será muy magnético o poco magnético. Los materiales como el Fe, Ni, Co y algunas de sus aleaciones son ejemplos de materiales **ferromagnéticos**. Muchos materiales cerámicos, como la ferrita de níquel zinc y la ferrita de manganeso zinc, son ejemplos de materiales **ferrimagnéticos**. Si alguien en algún momento utiliza el término "no magnético", significa que el material no es ni ferromagnético ni ferrimagnético. Estos materiales "no magnéticos" se clasifican como **diamagnéticos** (por ejemplo, los superconductores) o **paramagnéticos**. En algunos casos, también encontramos materiales que son **antiferromagnéticos** o **superparamagnéticos**. Analizaremos estas diferentes clases de materiales y sus aplicaciones un poco más adelante en este capítulo. Los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos suelen subclasificarse en materiales magnéticos suaves o duros. El hierro de elevada pureza y los aceros al carbono son ejemplos de materiales magnéticamente suaves, ya que se pueden magnetizar, pero cuando se elimina su fuente de magnetización, pierden su comportamiento magnético.

Los **imanes permanentes** o los **materiales magnéticos duros** conservan su magnetización. Se trata de "imanes" puros. Muchas ferritas cerámicas se utilizan para fabricar imanes económicos para refrigeradores. Un material magnético duro no pierde su comportamiento magnético con facilidad.

19-2

Dipolos y momentos magnéticos

El comportamiento magnético de los materiales se puede rastrear a la estructura de los átomos. Los electrones en los átomos tienen un movimiento planetario, ya que giran alrededor

Materiales magnéticos

¿Alguna vez se preguntó...

- ...cuáles son los materiales que se utilizan para fabricar casetes de audio y de video?
- ...qué afecta a la "fuerza de atracción" de un imán?
- ...qué papeles desempeñan los materiales magnéticos en la secuenciación del ADN?
- ...qué son los materiales magnéticos "blandos" y "duros"?
- ...existen materiales "no magnéticos"?
- ...qué es "Spintronics"?
- ...existen o no materiales que desarrollan una deformación mecánica al estar sometidos a un campo magnético?
- ...cuál fue el único matrimonio que, como equipo, ganó el Premio Nobel?

Todo material existente en el mundo responde a la presencia de un campo magnético. Los materiales magnéticos se utilizan para operar motores eléctricos, generadores y transformadores. Gran parte de la tecnología de almacenamiento de datos (discos duros de computadora, discos flexibles, casetes de audio y de video y similares) se basa en partículas magnéticas. Los materiales magnéticos también se utilizan en altoparlantes,

teléfonos, reproductores de discos compactos, televisores y reproductores de video. Los superconductores también se pueden considerar como materiales magnéticos; sus aplicaciones se analizaron en el capítulo 18. Los materiales magnéticos, como las partículas de óxido de hierro (Fe_3O_4), se utilizan para elaborar exóticas composiciones de "imanes líquidos", es decir, ferrofluidos. Las mismas partículas de óxido de hierro

EJEMPLO 18-12 Polarización en el titanato de bario

Calcule la máxima polarización por centímetro cúbico y la carga máxima que se puede almacenar por centímetro cuadrado de titanato de bario.

SOLUCIÓN

El producto de la carga y la distancia entre cargas nos da la resistencia de los bipolos. En el BaTiO_3 , las separaciones son las distancias en que se han desplazado los iones Ti^{4+} y O^{2-} de sus puntos normales en la red cristalina (Fig. 18-28). La carga de cada ion es el producto de q y el número de electrones en exceso o en defecto. Por tanto, los momentos bipolares son

$$\begin{aligned}\text{Ti}^{4+}: & (1.6 \times 10^{-19})(4 \text{ electrones/ion})(0.06 \times 10^{-8} \text{ cm}) \\ & = 0.384 \times 10^{-27} \text{ C} \cdot \text{cm/ion}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{O}_{(\text{superior})}^{2-}: & (1.6 \times 10^{-19})(2 \text{ electrones/ion})(0.09 \times 10^{-8} \text{ cm}) \\ & = 0.288 \times 10^{-27} \text{ C} \cdot \text{cm/ion}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{O}_{(\text{costado})}^{2-}: & (1.6 \times 10^{-19})(2 \text{ electrones/ion})(0.06 \times 10^{-8} \text{ cm}) \\ & = 0.192 \times 10^{-27} \text{ C} \cdot \text{cm/ion}\end{aligned}$$

Cada ion de oxígeno es compartido con otra celda unitaria, por lo que el momento bipolar total en la celda unitaria es:

$$\begin{aligned}\text{Aumento bipolar} &= (1 \text{ Ti}^{4+} / \text{celda})(0.384 \times 10^{-27}) \\ &\quad + (1 \text{ O}^{2-} \text{ de la parte superior a la inferior de la celda})(0.288 \times 10^{-27}) \\ &\quad + (2 \text{ O}^{2-} \text{ de los cuatro costados de la celda})(0.192 \times 10^{-27}) \\ &= 1.056 \times 10^{-27} \text{ C} \cdot \text{cm/celda}\end{aligned}$$

La polarización por cm^3 es:

$$\begin{aligned}P &= \frac{1.056 \times 10^{-27} \text{ C} \cdot \text{cm/celda}}{(3.98 \times 10^{-8} \text{ cm})^2(4.03 \times 10^{-8} \text{ cm})} \\ &= 1.65 \times 10^{-5} \text{ C/cm}^2\end{aligned}$$

La carga total en un cristal de BaTiO_3 de $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ es:

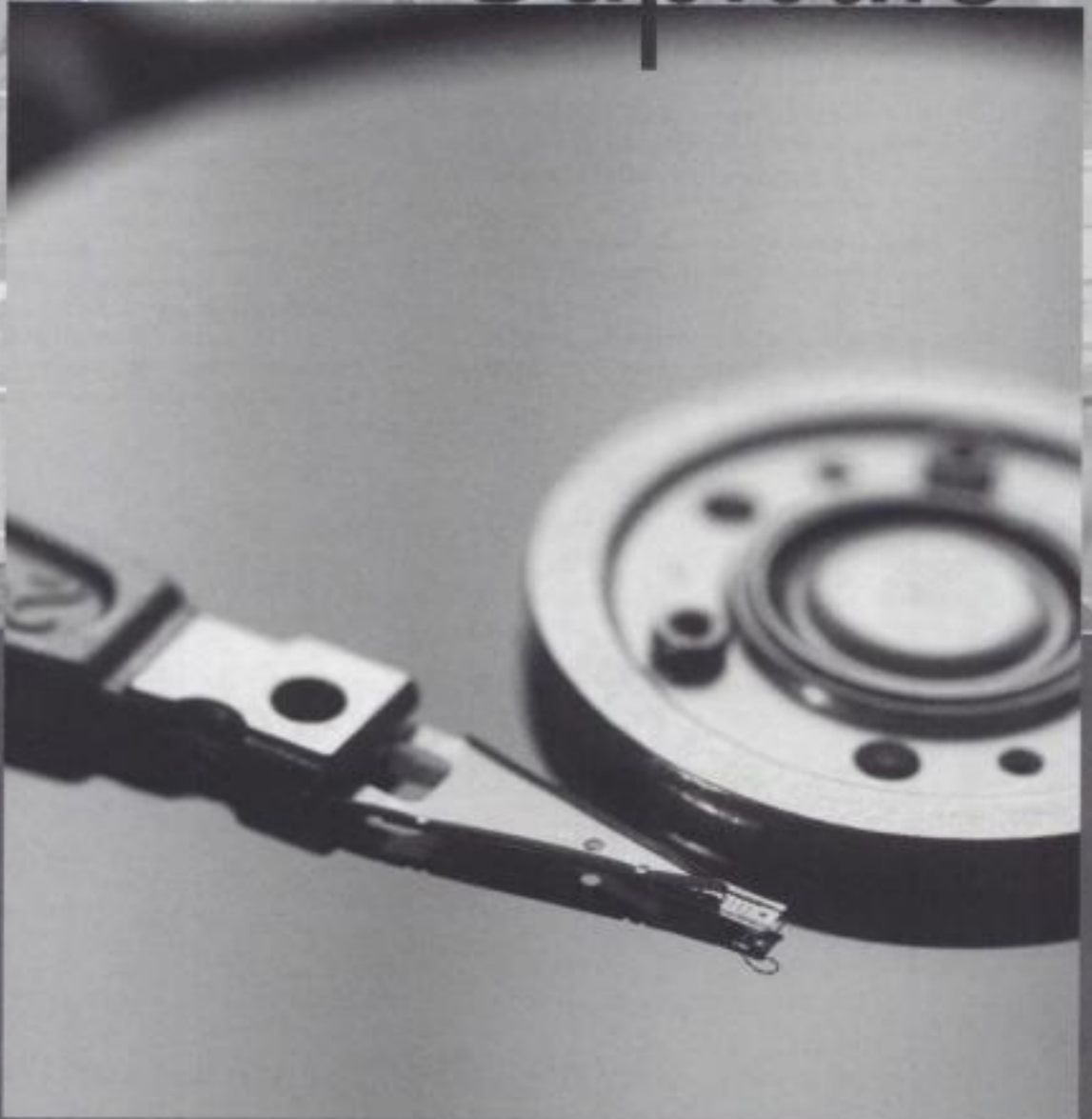
$$\begin{aligned}Q &= PA = (1.65 \times 10^{-5} \text{ C/cm}^2)(1 \text{ cm})^2 \\ &= 1.65 \times 10^{-5} \text{ C}\end{aligned}$$

EJEMPLO 18-13 Diseño de un capacitor multicapas

Debe diseñarse un capacitor multicapas utilizando una formulación basada en el BaTiO_3 y que contenga SrTiO_3 . La constante dieléctrica del material es 3 000. (a) Calcule la capacitancia de un capacitor multicapas formado por 100 capas conectadas en paralelo utilizando electrodos de Ni. Los costados del capacitor son $10 \times 5 \text{ mm}$ y el espesor de cada capa es de $10 \mu\text{m}$. (b) ¿Cuál es el papel que representa el SrTiO_3 ? (c) ¿Cuál será la técnica de procesamiento que se utilizará para fabricarlos?

By Arkanosant...

Capítulo



Un disco duro magnético es el corazón de las computadoras personales y de las portátiles. Estos discos usan materiales magnéticos que resultan únicos por el hecho de que en los mismos se puede grabar información con gran facilidad y, a la vez, esta información no puede ser fácilmente borrada. El sistema de disco duro es complejo, ya que, como forma de almacenamiento de la información, utiliza películas delgadas de materiales magnéticos nanoestructurados y a nanoescala. (Cortesía de Seagate.)

19-4 Materiales diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, ferrimagnéticos y superparamagnéticos

Como se mencionó antes, no existe un material que sea "no magnético". Todos los materiales responden a los campos magnéticos. Cuando a un material se le aplica un campo magnético, se observan varios tipos de comportamiento (Fig. 19-3).

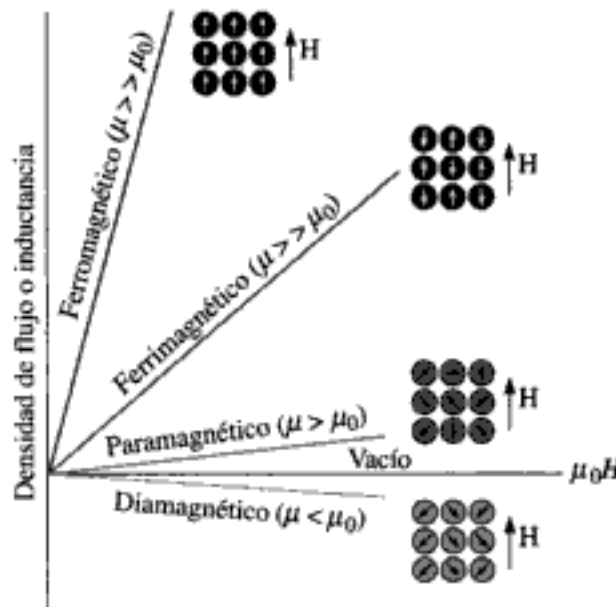


Figura 19-3

Efecto del material del núcleo sobre la densidad de flujo. En los materiales diamagnéticos el momento magnético se opone al campo. Para una misma intensidad de campo se presentan momentos progresivamente más elevados en los materiales paramagnéticos, ferrimagnéticos y ferromagnéticos.

Comportamiento diamagnético Al actuar sobre cualquier átomo, un campo magnético induce un dipolo magnético sobre todo el átomo, influyendo sobre el momento magnético causado por los electrones en sus órbitas. Estos dipolos se oponen al campo magnético, haciendo que la magnetización sea menor que cero. Este comportamiento, llamado **diamagnetismo**, aporta una permeabilidad relativa de aproximadamente 0.99995 (o una susceptibilidad negativa de aproximadamente -10^{-6} . Obsérvese el signo negativo). Materiales como el cobre, la plata, el silicio, el oro y la alúmina son diamagnéticos a la temperatura ambiente. Los superconductores son diamagnéticos perfectos ($\chi_m = -1$); a temperaturas más elevadas o en presencia de un campo magnético, pierden su superconductividad (capítulo 18). En un material diamagnético la dirección de la magnetización (M) es opuesta a la dirección del campo aplicado (H).

Paramagnetismo Cuando los materiales tienen electrones no apareados, se asocia a cada átomo un momento magnético neto debido al giro de los electrones. Al aplicárseles un campo magnético, los dipolos se alinean con el campo, causando una magnetización positiva. Sin embargo, dado que los dipolos no interactúan entre sí, se requieren campos magnéticos extremadamente grandes para alinear todos los dipolos. Además, este efecto se pierde en cuanto se elimina el campo magnético. Este efecto, conocido como **paramagnetismo**, se encuentra en metales como el aluminio, el titanio y las aleaciones de cobre. La susceptibilidad (χ_m) de los materiales paramagnéticos es positiva y se encuentra entre 10^{-4} y 10^{-5} . Los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos a una temperatura superior a la de Curie también presentan un comportamiento paramagnético.

Ferromagnetismo La causa del comportamiento **ferromagnético** son los niveles de energía no totalmente ocupados en el nivel 3d del hierro, níquel y cobalto. En algunos otros

materiales, incluyendo el gadolinio (Gd), se presenta un comportamiento similar. En los materiales ferromagnéticos, los dipolos permanentes no apareados se alinean con facilidad con el campo magnético impuesto debido a la interacción de intercambio o al refuerzo mutuo que ejercen los dipolos; se obtienen grandes magnetizaciones incluso con pequeños campos magnéticos, que resultan en importantes susceptibilidades cercanas a 10^6 . De manera parecida a los materiales ferroeléctricos (capítulo 18), la susceptibilidad de los materiales ferromagnéticos depende de la intensidad del campo magnético aplicado. Esto es similar al comportamiento mecánico de los elastómeros cuyo módulo de elasticidad depende del nivel de la deformación. Por encima de la temperatura de Curie, los materiales ferromagnéticos se comportan como paramagnéticos y su susceptibilidad está dada por la siguiente ecuación, conocida como ley de Curie-Weiss:

$$\chi_m = \frac{C}{(T - T_c)} \quad (19-10)$$

En esta ecuación, C es una constante que depende del material, T_c es la temperatura de Curie y T es la temperatura por encima de T_c . Una ecuación esencialmente similar describe el cambio en permisividad dieléctrica por encima de la temperatura de Curie de los materiales ferroeléctricos (capítulo 18). Igual que en el caso de los materiales ferroeléctricos, los materiales ferromagnéticos presentan una formación de dominios de ciclo de histéresis y de dominios magnéticos. Estos materiales se analizarán en la siguiente sección.

Antiferromagnetismo En materiales como el manganeso, el cromo, el MnO y el NiO, los momentos magnéticos producidos en bipolos vecinos se alinean oponiéndose unos a los otros, aun cuando la intensidad de cada dipolo sea muy elevada. Este efecto se ilustra para el caso del MnO en la figura 19-4. Estos materiales son **antiferromagnéticos** y tienen una magnetización igual a cero. La susceptibilidad magnética es positiva y pequeña. También el CoO y el MnCl₂ son ejemplos de materiales antiferromagnéticos.

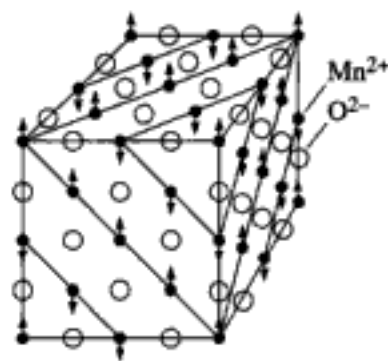


Figura 19-4

La estructura cristalina del MnO está formada por capas alternas de planos de tipo {111} de iones de oxígeno y de manganeso. Los momentos magnéticos de los iones de manganeso en cada plano alterno {111} están alineados en oposición. En consecuencia, el MnO es antiferromagnético.

Ferrimagnetismo En los materiales cerámicos, los distintos iones tienen momentos magnéticos diferentes. En un campo magnético, los dipolos del catión A pueden alinearse con el campo, en tanto que los dipolos del catión B se oponen al campo. Pero, debido a que la intensidad o el número de dipolos no son iguales, el resultado es una magnetización neta. Los materiales **ferrimagnéticos** pueden proporcionar una buena amplificación del campo impuesto. En una sección posterior, veremos un grupo de materiales cerámicos llamado ferritas que tienen este comportamiento. Muestran una gran susceptibilidad magnética dependiendo del campo magnético que es similar a la de los materiales ferromagnéticos. También muestran un comportamiento Curie-Weiss (similar al de los materiales ferromagnéticos) cuando están a temperaturas por encima de la temperatura de transición de Curie. La mayoría de los materiales ferrimagnéticos son cerámicos y buenos aislantes eléctricos. Por tanto, en estos materiales las pérdidas eléctricas (conocidas como pérdidas por corrientes de Foucault o parásitas) son

mucho menores en comparación con las de los materiales ferromagnéticos metálicos. Es por eso que las ferritas se utilizan en muchas aplicaciones de alta frecuencia.

Superparamagnetismo Cuando el tamaño del grano de los ferromagnéticos y de los ferrimagnéticos disminuye por debajo de un cierto tamaño crítico, estos materiales se comportan como si fueran paramagnéticos. La energía del dipolo magnético de cada partícula se vuelve comparable a la energía térmica. Este pequeño momento magnético cambia su dirección de manera aleatoria (como resultado de la energía térmica). Es por eso que el material se comporta como si no tuviera un momento magnético neto. Esto se conoce como superparamagnetismo. Entonces, si producimos partículas de óxido de hierro (Fe_3O_4) de un tamaño de 3 a 5 nm, se comportan como materiales superparamagnéticos. Estas partículas superparamagnéticas de óxido de hierro se utilizan para formar dispersiones en las fases portadoras acuosas u orgánicas, o para formar "imanes líquidos" o ferrofluidos.[4,5] Las partículas en el fluido se mueven en respuesta a un gradiente en el campo magnético. Sin embargo, dado que las partículas forman una solución estable, se mueve toda la dispersión y, entonces, el material se comporta como un imán líquido. Estos tipos de materiales se utilizan en los sellos de las unidades de disco duro de las computadoras y en los altoparlantes como medios de transferencia térmica (de enfriamiento). El imán permanente utilizado en un altoparlante mantiene los imanes líquidos en su lugar. Las partículas superparamagnéticas del óxido de hierro (Fe_3O_4) también pueden recubrirse con diferentes productos químicos y utilizarse para separar moléculas, proteínas y celdas de ADN de otras moléculas.

El siguiente ejemplo ilustra cómo debe seleccionarse un material para una aplicación dada.

EJEMPLO 19-2 *Diseño y selección de materiales para un solenoide*

Necesitamos una bobina solenoide que produzca una inductancia de por lo menos 2 000 gauss cuando por el conductor fluya una corriente de 10 mA. Debido a limitaciones de espacio, la bobina debe estar compuesta por 10 vueltas en una longitud de 1 cm. Seleccione un material para el núcleo de la bobina.

SOLUCIÓN

Primero, podemos determinar el campo magnético H producido por la bobina. De la ecuación 19-2:

$$H = \frac{nI}{l} = \frac{(10)(0.01 \text{ A})}{0.01 \text{ m}} = 10 \text{ A/m}$$

$$H = (10 \text{ A/m})(4\pi \times 10^{-3} \text{ oersted/A/m}) = 0.126 \text{ oersted}$$

Si la inductancia B debe ser por lo menos de 2 000 gauss, entonces la permeabilidad del material del núcleo deberá ser:

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{2000}{0.126} = 15\,873 \text{ gauss/oersted}$$

La permeabilidad relativa del material del núcleo deberá ser por lo menos:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{15\,873}{1} = 15\,873$$

Si examinamos los materiales magnéticos de la tabla 19-4, encontraremos que el Permalloy 4-79 tiene una permeabilidad máxima relativa de 80 000 y podría ser una buena selección para el material del núcleo.

Desde un punto de vista fenomenológico, los materiales ferromagnéticos son similares a los ferroeléctricos. Un cristal de hierro o una pieza policristalina de acero al bajo carbono son ferromagnéticos; sin embargo, normalmente no muestran una magnetización neta. Dentro del cristal único o de la estructura policristalina de un material ferromagnético o ferrimagnético, se produce una subestructura compuesta de dominios magnéticos, incluso en ausencia de un campo externo. Esto ocurre porque la presencia de numerosos dominios en el material, organizados de manera que la magnetización neta sea cero, minimiza la energía magnetoestática. Los **dominios** son regiones dentro del material en las cuales todos los dipolos están alineados en cierta dirección. En un material que jamás haya sido expuesto a un campo magnético, los dominios individuales tienen orientaciones al azar. La magnetización neta en un material ferromagnético o ferrimagnético virgen es en su totalidad igual a cero [Fig. 19-5(a)]. Igual que en el caso de los materiales ferroeléctricos, la aplicación de un campo magnético (polarización) obligará a muchos de los dominios magnéticos a alinearse a lo largo de la dirección del campo magnético.

Las fronteras, conocidas como **paredes de Bloch**, separan los dominios magnéticos individuales. Las paredes de Bloch son zonas angostas en las cuales la dirección del momento magnético cambia gradual y continuamente, desde el correspondiente a un dominio hasta el siguiente [Fig. 19-5(b)]. Los dominios normalmente son muy pequeños, de aproximadamente 0.005 cm o menos, en tanto que las paredes de Bloch son de aproximadamente 100 nm de espesor.

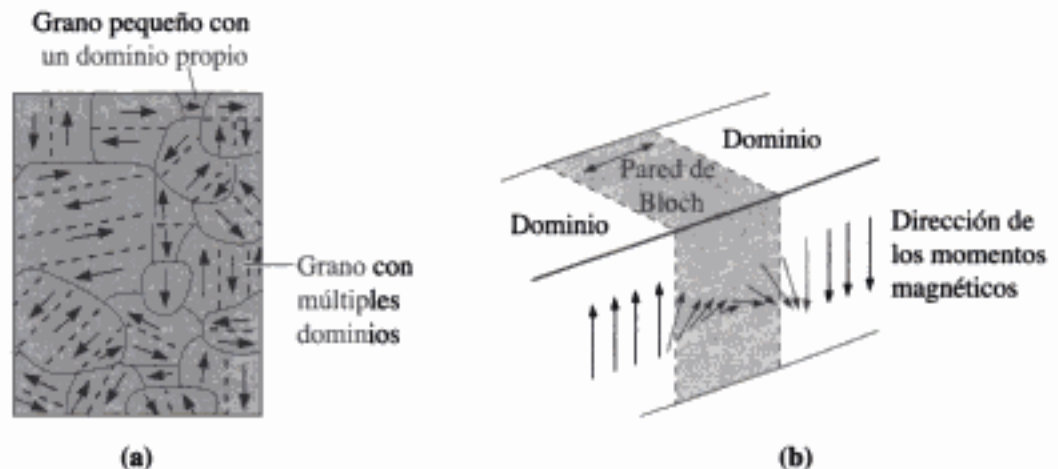


Figura 19-5 (a) Esquema cualitativo de los dominios magnéticos en un material policristalino. Las líneas punteadas muestran la demarcación entre diferentes dominios magnéticos; las curvas definen los bordes de grano. (b) En átomos vecinos, los momentos magnéticos cambian continuamente de dirección a través de las fronteras entre dominios.

Movimiento de los dominios en un campo magnético Cuando se impone un campo magnético sobre el material, los dominios que están prácticamente alineados en relación con el campo crecen a expensas de los no alineados. A fin de que crezcan los dominios, las paredes de Bloch deben moverse; el campo proporciona la fuerza requerida para este movimiento. Inicialmente, los dominios crecen con dificultad, y se requieren grandes incrementos en el campo para producir apenas un poco de magnetización. Esta situación se presenta en la figura 19-6 en forma de una pendiente reducida, que es la permeabilidad inicial del material. Entonces, de manera similar a los materiales ferroeléctricos y a los elastómeros, los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos no son lineales. Conforme aumenta la intensidad del campo, los dominios con orientación favorable crecen con mayor facilidad y, al mismo tiempo, se incrementa también la permeabilidad. Se puede definir una permeabilidad máxima como

orientaciones aleatorias. Como resultado, gran parte de los dominios quedan orientados cerca de la dirección del campo original; una magnetización residual, que se conoce como **remanencia** (M_r), se encuentra presente en el material. El valor de B_r (por lo común, en teslas) se conoce como la retentividad del material magnético. El material se comporta como un imán permanente. La figura 19-7(a) muestra este efecto en la curva magnetización-campo. Obsérvese que el ciclo $M-H$ muestra saturación, pero el ciclo $B-H$, no. El campo magnético que se necesita para llevar la magnetización inducida a un valor cero se conoce como la coercitividad del material. Ésta es una propiedad sensible a la microestructura.

Para los materiales magnéticos para grabación, se utilizan partículas de Fe , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, Fe_3O_4 , así como partículas de CrO_2 en forma de aguja. La forma alargada de las partículas magnéticas logra una coercitividad más elevada (H_c). La dependencia de la coercitividad (H_c) sobre la forma de una partícula o de un grano se conoce como **anisotropía magnética de forma**. La coercitividad de los materiales para grabar necesita ser menor que la correspondiente a los imanes permanentes, dado que los datos escritos en un medio magnético de almacenamiento deben poder borrarse. Por otra parte, los valores de coercitividad deben ser superiores a los correspondientes a los materiales magnéticos suaves, dado que deseamos conservar la información almacenada. Este tipo de materiales se describen como magnéticamente semiduros.

Efecto de la inversión del campo Si ahora aplicamos un campo en la dirección inversa, los dominios crecen con una alineación en la dirección opuesta. Se requiere un campo coercitivo H_c para obligar a los dominios a una orientación aleatoria y que se cancelen entre sí. Con incrementos adicionales en la intensidad del campo, los dominios finalmente se alinearán hasta la saturación en la dirección opuesta.

Como el campo continuamente cambia de sentido, la relación entre magnetización y campo traza un **ciclo de histéresis**. Éste aparece en ambos trazos ($B-H$ y $M-H$). El área contenida en el interior del ciclo de histéresis se relaciona con la energía consumida durante un ciclo del campo alternante. El área sombreada que aparece en la figura 19-7(b) representa el producto $B-H$ y se conoce como la potencia del material magnético.

19-6 La temperatura de Curie

Cuando se incrementa la temperatura de un material ferromagnético o ferrimagnético, la energía térmica adicional incrementa la movilidad de los dominios, facilitándoles su alineación, pero también impidiendo que se conserven alineados cuando se elimina el campo. En consecuencia,

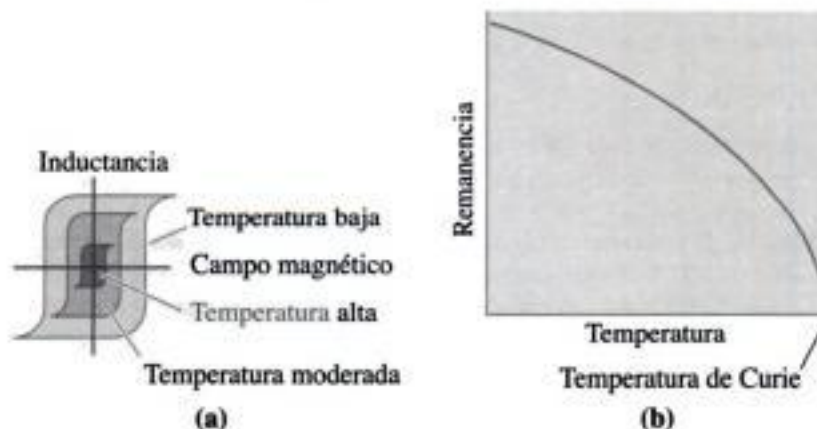


Figura 19-8 Efecto de la temperatura sobre (a) el ciclo de histéresis y (b) la remanencia. El comportamiento ferromagnético desaparece por encima de la temperatura de Curie.

TABLA 19-3 ■ Temperaturas de Curie para materiales seleccionados

Material	Temperatura de Curie (°C)
Gadolinio	16
$\text{Nd}_2\text{Fe}_{12}\text{B}$	312
Níquel	358
$\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$	469
Co_5Sm	747
Hierro	771
Alnico 1	780
Cunico	855
Alnico 5	900
Cobalto	1117

tanto la magnetización de saturación como la remanencia y el campo coercitivo disminuyen todos a temperaturas elevadas (Fig. 19-8). Si la temperatura excede la **temperatura de Curie** (T_c), ya no se presenta comportamiento ferromagnético o ferrimagnético. En cambio, el material se comporta como paramagnético. La temperatura de Curie (tabla 19-3), que depende del material, puede modificarse utilizando elementos de aleación. Los científicos franceses Marie y Pierre Curie (el único matrimonio que obtuvo un premio Nobel; Marie Curie realmente ganó dos premios Nobel) hicieron investigaciones sobre los imanes, y la temperatura de Curie hace honor a sus nombres. Los dipolos pueden de todas maneras alinearse en un campo magnético por encima de la temperatura de Curie, pero se alinean de manera aleatoria al eliminar el campo magnético.

El siguiente ejemplo muestra que T_c es una consideración importante para el diseño de los imanes permanentes.

EJEMPLO 19-3 *Diseño y selección de materiales para un imán de alta temperatura*

Seleccione un imán permanente para una aplicación en un vehículo aeroespacial que debe reingresar a la atmósfera terrestre. Durante el reingreso, el imán puede quedar expuesto a campos magnéticos de hasta 600 oersted y puede, durante breves periodos de tiempo, alcanzar temperaturas de hasta 500°C. Deseamos que el material tenga la máxima potencia posible y que conserve su magnetización después del reingreso.

SOLUCIÓN

Primero es necesario seleccionar materiales que potencialmente tengan un campo coercitivo H_c suficientemente alto y una temperatura de Curie tal que el reingreso no lo desmagnetice. De la tabla 19-3, podemos eliminar materiales como el gadolinio, el níquel, el $\text{Nd}_2\text{Fe}_{12}\text{B}$ y las ferritas cerámicas, ya que todos ellos tienen temperaturas Curie por debajo de 500°C. Otros materiales de la tabla 19-4, como el acero y el Alnico 1, pueden también eliminarse, ya que sus campos coercitivos quedan por debajo de los 600 oersted.

De los materiales magnéticos permanentes restantes en la tabla 19-3, el Alnico 12 tiene la potencia más pequeña y se puede eliminar. Entonces, nuestra elección queda entre el Alnico 5 y el Co_5Sm . El Co_5Sm tiene cuatro veces la potencia del Alnico 5 y, en función del desempeño, podría resultar nuestra mejor elección. Sin embargo, algunas de las ventajas del Co_5Sm se compensan con su elevado costo.

4. Pequeña remanencia.
5. Pequeño ciclo de histéresis.
6. Respuesta rápida a campos magnéticos de alta frecuencia.
7. Resistividad eléctrica elevada.

Una magnetización de saturación alta permite que el material realice trabajo, en tanto que una elevada permeabilidad hace posible la obtención de la magnetización de saturación con campos magnéticos impuestos de valor reducido. Un campo coercitivo pequeño también indica que los dominios se pueden reorientar utilizando campos magnéticos reducidos. Es deseable tener una pequeña remanencia, de forma que cuando se elimine el campo externo prácticamente no quede nada de magnetización. Estas características también conducen a un ciclo de histéresis pequeño y, por tanto, a minimizar las pérdidas de energía durante la operación.

Si la frecuencia del campo aplicado es tan elevada que los dominios no tienen tiempo para realinearse en cada ciclo, el dispositivo posiblemente se calentará debido a la fricción dipolar. Además, las frecuencias más elevadas producen de forma natural más calentamiento, debido a que el material cicla con mayor frecuencia a través del ciclo de histéresis, perdiendo más energía en cada ciclo. Para aplicaciones de alta frecuencia, los materiales deben permitir que los dipolos se alineen a velocidades excepcionalmente rápidas.

También es posible perder energía por calentamiento si se producen corrientes parásitas. Durante la operación, se pueden inducir corrientes eléctricas en el material magnético. Estas corrientes producen pérdidas de potencia y calentamiento en joule, es decir I^2R (capítulo 18). Las pérdidas por corrientes parásitas, o de eddy, son particularmente severas cuando el material opera a frecuencias elevadas. Si la resistividad eléctrica es alta, estas corrientes parásitas se pueden limitar a un valor mínimo. Los imanes suaves producidos con materiales cerámicos ferrimagnéticos tienen una elevada resistividad y, por tanto, es menos probable que se calienten en comparación con los materiales ferromagnéticos metálicos. Recientemente, se ha utilizado, en varias aplicaciones relacionadas con el control de la vibración, como, por ejemplo, el sistema Magne-Ride™ de Delphi, una clase de materiales inteligentes, conocidos como fluidos magnetorreológicos o MR, basados en partículas de hierro carbonilo magnético suave (Fe). [7-8] Estos materiales son como pinturas magnéticas y es posible hacer que absorban energía de choques y vibraciones al activar un campo magnético. La rigidización de los fluidos MR es controlable y reversible. Algunos de los nuevos modelos de Cadillac y el Corvette ofrecen una suspensión basada en estos materiales inteligentes.

Materiales para almacenamiento de datos Los materiales magnéticos se utilizan para el almacenamiento de datos. Se almacena la memoria magnetizando un material en cierta dirección. Por ejemplo, si el polo "norte" está activo, el bit de información almacenado es igual a 1. Si el polo "norte" no está activo, entonces lo que se almacena es un 0.

Para esta aplicación, son preferibles los materiales con un ciclo de histéresis cuadrado, una remanencia baja, una magnetización por saturación también baja y un campo coercitivo reducido. Las ferritas duras basadas en Ba, CrO_2 , partículas aciculares de hierro y $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ satisfacen estos requisitos. La cinta magnética de las tarjetas de crédito y las tarjetas de las máquinas de los bancos, así como muchos casetes de audio se fabrican utilizando partículas de $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ o de Fe_3O_4 . El ciclo cuadrado asegura que un bit de información que se coloque en el material mediante un campo magnético quede almacenado; es necesario un cambio abrupto y grande en la magnetización para eliminar la información del ferromagnético. Además, la magnetización producida por campos externos reducidos mantiene reducidos el campo coercitivo (H_c), la magnetización por saturación y la remanencia (B_r).

Los valores B_r y los H_c correspondientes a algunos materiales magnéticos comunes para grabación aparecen en la tabla 19-5. [9]

Se han desarrollado muchas nuevas aleaciones con base en Co-Pt-Ta-Cr para la manufactura de discos duros. Los discos duros para computadora se fabrican utilizando películas delgadas pulverizadas de estos materiales. Como expusimos en capítulos anteriores, se están desarrollando muchas aleaciones diferentes, como aquellas basadas en Fe-Pt y Fe-Pd nanoestructurados, para

TABLA 19-5 ■ Materiales comunes para el registro magnético [16]

	Longitud de la partícula μm	Relación de aspecto	Magnetización (B_r)		Coercitividad (H_c)		Área de la superficie m^2/g	Temperatura de Curie (T_c)°C
			Wb/m^2	emu/cc	kA/m	Oe		
$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	0.20	5:1	0.44	350	22–34	420	15–30	600
$\text{Co-}\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	0.20	6:1	0.48	380	30–75	940	20–35	700
CrO_2	0.20	10:1	0.50	400	30–75	950	18–55	125
Fe	0.15	10:1	1.40*	1100*	56–176	2200	20–60	770
Ferrita de bario	0.05	0.02 μm de espesor	0.40	320	56–240	3000	20–25	350

* Para partículas recubiertas estables, use sólo 50 a 80% de estos valores, debido al menor volumen de partículas magnéticas. (Fuente: De The Complete Handbook of Magnetic Recording, 4a. ed., por F. Jorgensen, p. 324, tabla 11-1, Copyright © 1996. Reimpreso con permiso de The McGraw-Hill Companies.)

aplicaciones de almacenamiento de datos. Más recientemente, se ha creado una tecnología conocida como *espintrónica* (electrónica basada en el giro del electrón).[10] En esta tecnología, la idea principal es aprovechar el giro de los electrones como una manera de afectar el flujo de la corriente eléctrica (conocida como corriente polarizada por el giro) para la fabricación de dispositivos, como, por ejemplo, transistores de efecto de campo (FET).[11] También se está considerando la utilización del giro de los electrones (hacia arriba o hacia abajo) como una forma de almacenar la información. Un ejemplo con mucho éxito de un dispositivo del mundo real, basado en la espintrónica es como un sensor gigante de magnetorresistencia (GMR, de *giant magnetoresistance*) que se utiliza para leer información de los discos duros de las computadoras.[12]

Imanes permanentes Finalmente, los materiales magnéticos se utilizan para la fabricación de imanes permanentes de gran potencia (tabla 19-6). Los imanes permanentes poderosos, que a menudo se les llama **imanes duros**, requieren de lo siguiente:

1. Alta remanencia (dominios estables).
2. Alta permeabilidad.
3. Alto campo coercitivo.
4. Gran ciclo de histéresis.
5. Alta potencia (o elevado producto BH).

Algunos de éstos son ejemplos excelentes de aplicación de los intermetálicos (capítulos 10-12). El *record* para cualquier potencia se obtiene para los imanes $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ con una potencia de $\sim 445 \text{ kJm}^{-3}$ (~ 56 Mega-Gauss-Oersted (MGOe)).[13] Estos imanes están hechos en

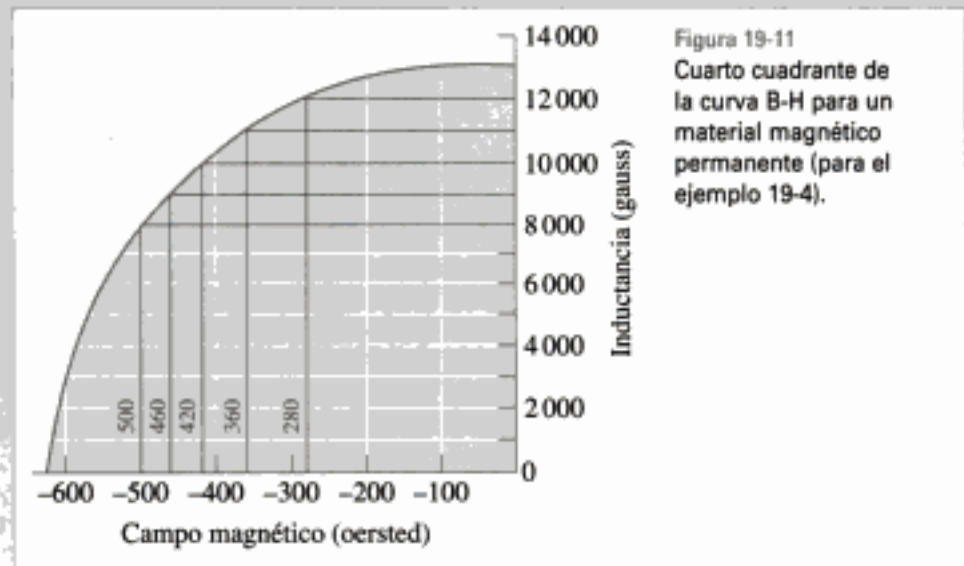
TABLA 19-6 ■ Propiedades seleccionadas de materiales magnéticos

Material	Nombre común	$\mu_r M_r$ (T)	$\mu_r H_c$ (T)	$(BH)_{\text{máx}}$ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)	T_c (°C)
Fe-Co	Acero-cobalto	1.07	0.02	6	887
Fe-Co-Al-Ni	Alnico-5	1.05	0.06	44	880
$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	Ferrita	0.42	0.31	34	469
SmCo_5	Sm-Co	0.87	0.80	144	723
$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	Nd-Fe-B	1.23	1.21	290–445	312

(Fuente: Adaptado de *Permanent Magnetism*, por R. Skomski y J. M. D. Coey, p. 23, tabla 1-2, J. M. D. Coey y D. R. Tilley, eds., Copyright © 1999. Institute of Physics Publishing. Adaptado con autorización.)

EJEMPLO 19-4 *Producto de energía o potencia de los imanes permanentes*

Determine la potencia o producto BH , para el material magnético cuyas propiedades se muestran en la figura 19-11.

**SOLUCIÓN**

Se han dibujado varios rectángulos en el cuarto cuadrante de la curva B - H . En cada uno de ellos el producto BH es igual a:

$$BH_1 = (12\,000)(280) = 3.4 \times 10^6 \text{ gauss} \cdot \text{oersted}$$

$$BH_2 = (11\,000)(360) = 4.0 \times 10^6 \text{ gauss} \cdot \text{oersted}$$

$$BH_3 = (10\,000)(420) = 4.2 \times 10^6 \text{ gauss} \cdot \text{oersted} = \text{máxima}$$

$$BH_4 = (9\,000)(460) = 4.1 \times 10^6 \text{ gauss} \cdot \text{oersted}$$

$$BH_5 = (8\,000)(500) = 4.0 \times 10^6 \text{ gauss} \cdot \text{oersted}$$

Entonces, la potencia es de aproximadamente $4.2 \times 10^6 \text{ gauss} \cdot \text{oersted}$.

EJEMPLO 19-5 *Diseño y selección de materiales magnéticos*

Seleccione un material magnético apropiado para las siguientes aplicaciones: un motor eléctrico de alta eficiencia, un dispositivo magnético para mantener cerradas las puertas de las alacenas, un imán utilizado en un amperímetro o en un voltímetro y en imagen de resonancia magnética.

SOLUCIÓN

Motor eléctrico de alta eficiencia: A fin de minimizar las pérdidas por histéresis, podríamos utilizar un hierro al silicio orientado, aprovechando su comportamiento anisotrópico y su pequeño ciclo de histéresis. Dado que la aleación de hierro silicio es conductora eléctricamente, produciríamos una estructura laminada, con hojas delgadas del hierro silicio empareadas en un material dieléctrico no conductor. Se recomendarían hojas de un espesor inferior a aproximadamente 0.5 mm.

Imán para puertas de alacena: Los pestillos magnéticos que se utilizan para sujetar las puertas de las alacenas deben ser imanes permanentes; sin embargo, un bajo costo es una característica de diseño más importante que una elevada potencia. Se recomendaría un acero ferrítico económico o una ferrita de bajo costo.

Imanes para un amperímetro o un voltímetro: Para estas aplicaciones, las aleaciones de Alnico son particularmente eficaces. Encontramos que estas aleaciones son las menos sensibles a los cambios en temperatura, lo que asegura lecturas precisas de corriente de voltaje dentro de un determinado rango de temperaturas.

Imagenología de resonancia magnética: Una de las aplicaciones para el MRI (*magnetic resonance imaging*) es el diagnóstico médico. En este caso, deseamos un imán muy poderoso. Un material magnético $\text{Nd}_2\text{Fe}_{12}\text{B}$, con un producto BH excepcionalmente alto, sería recomendable para esta aplicación. También es posible utilizar electroimanes muy poderosos utilizando superconductores (capítulo 18).

El siguiente ejemplo muestra la forma en que se puede calcular la potencia elevadora de un imán permanente.

EJEMPLO 19-6 Potencia elevadora de un imán

Calcule la fuerza en kN para una superficie de un metro cuadrado de un imán permanente cuya magnetización de saturación es de 1.61 tesla.

SOLUCIÓN

Como se observó anteriormente, la fuerza de atracción de un imán permanente está dada por:

$$F = \frac{\mu_0 M^2 A}{2}$$

Hemos obtenido el valor de $\mu_0 M = 1.61$ tesla. Podemos volver a presentar esta ecuación que proporciona la fuerza debida a la acción de un imán permanente como sigue:

$$F = \frac{\mu_0 M^2 A}{2} = \frac{(\mu_0 M)^2 A}{2\mu_0}$$

$$\therefore \frac{F}{A} = \frac{(1.61 \text{ T})^2}{2 \left(4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \right)} = 1031.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Obsérvese que en este caso la fuerza será de 1031 kN, dado que el área (A) quedó especificada igual a 1 m^2 . Esto representa ~ 10.31 kilogramos/cm².

19-8

Materiales magnéticos metálicos y cerámicos

Veamos los materiales cerámicos comunes y las aleaciones que se utilizan en aplicaciones magnéticas y analicemos cómo podemos mejorar sus propiedades y desempeño. Algunos materiales poliméricos han mostrado actividad magnética, pero sus temperaturas de transición Curie son demasiado bajas en comparación con las correspondientes de los materiales magnéticos metálicos y cerámicos.[15]

Metales magnéticos El hierro, el níquel y el cobalto puros no se utilizan normalmente en aplicaciones eléctricas, debido a sus conductividades eléctricas elevadas y a ciclos de histéresis relativamente grandes, lo que conduce a pérdidas de energía excesivas. Sin embargo, son imanes permanentes relativamente malos; los dominios son fáciles de reorientar y tanto la remanencia como el producto BH son reducidos en comparación con los correspondientes a aleaciones más complejas. Se obtiene algún cambio en las propiedades magnéticas introduciendo defectos en la estructura. Las dislocaciones, los límites de grano, las interfaces entre fases múltiples y los defectos puntuales ayudan a fijar las fronteras de los dominios; de esta manera, los dominios se mantienen alineados cuando se elimina el campo magnetizante original.

Aleaciones de hierro-níquel Algunas aleaciones de hierro-níquel, como el Permalloy, tienen altas permeabilidades, lo que los hace útiles como imanes suaves. Un ejemplo de aplicación de estos imanes es la "cabeza" que graba o lee información en un disco de computadora (Fig. 19-12). Conforme el disco gira por debajo de la cabeza, una corriente produce un campo magnético en esta última. El campo magnético de la cabeza, a su vez, magnetiza una porción del disco. La dirección del campo producido en la cabeza determina la orientación de las partículas magnéticas incrustadas en el disco y, en consecuencia, se almacena información. Esta información puede recuperarse haciendo girar otra vez el disco por debajo de la cabeza. La región magnetizada en el disco induce una corriente en la cabeza; la dirección de la corriente depende de la dirección del campo magnético existente en el disco.

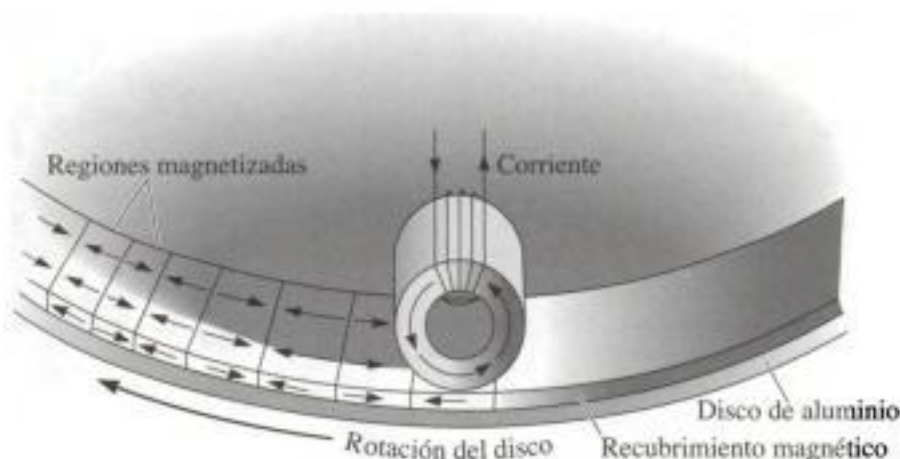


Figura 19-12 La información se puede almacenar o recuperar de un disco magnético mediante el uso de una cabeza electromagnética. En el almacenamiento, una corriente que pasa por la cabeza magnetiza dominios en el disco; durante la recuperación, los dominios magnéticos en el disco inducen una corriente eléctrica en la cabeza.

Hierro al silicio Se procesa en aceros de grano orientado. La introducción de 3 a 5% Si en el hierro produce una aleación que, después de un procesamiento apropiado, resulta útil en aplicaciones eléctricas, como motores y generadores. Aprovechamos el comportamiento magnético anisotrópico del hierro al silicio para obtener el mejor desempeño. Como resultado de la laminación y del recocido subsecuente, se forma una textura de hoja en la cual las direcciones $\langle 100 \rangle$ de cada grano quedan alineadas. Dado que el hierro al silicio se magnetiza con mayor facilidad en las direcciones $\langle 100 \rangle$, el campo requerido para darle magnetización de saturación es muy pequeño, y se observan tanto un pequeño ciclo de histéresis como una reducida remanencia (Fig. 19-13).[3] Este tipo de anisotropía se conoce como **anisotropía magnetocristalina**.

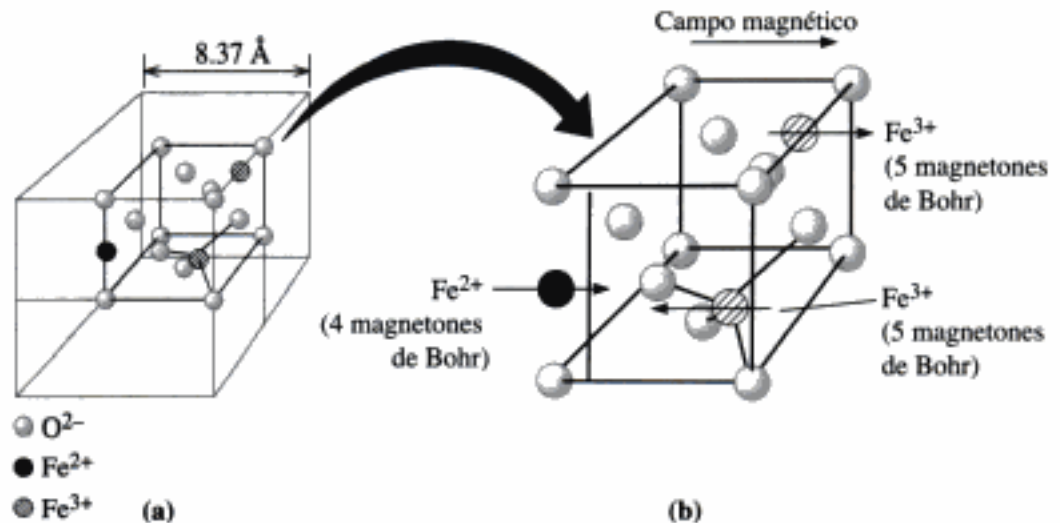


Figura 19-15 (a) Estructura de la magnetita, Fe_3O_4 . (b) Subcelda de la magnetita. Los momentos magnéticos de los iones en los sitios octaédricos se alinean con el campo magnético, pero los momentos de los iones en los sitios tetraédricos se oponen al campo. Esta organización iónica produce un momento magnético neto.

- Existen cuatro iones de oxígeno en las posiciones FCC de la subcelda.
- En cada borde y el centro de la subcelda están presentes sitios octaédricos, mismos que están rodeados por seis iones oxígeno. Un ion Fe^{2+} y un ion Fe^{3+} ocupan los sitios octaédricos.
- Los sitios tetraédricos tienen índices en la subcelda, de la forma $1/4, 1/4, 1/4$. Un ion Fe^{3+} ocupa uno de los sitios tetraédricos.
- Cuando se forman los iones Fe^{2+} , se eliminan los dos electrones $4s$ del hierro, pero todos los electrones $3d$ se quedan. Debido a que existen 4 electrones no apareados en el nivel $3d$ del hierro, la fuerza magnética del dipolo Fe^{2+} es cuatro magnetones de Bohr. Sin embargo, cuando se forma Fe^{3+} , los dos electrones $4s$ y uno de los electrones $3d$ son retirados. El ion Fe^{3+} tiene 5 electrones no apareados en el nivel $3d$ y, por lo tanto, tiene una fuerza de 5 magnetones de Bohr.
- Los iones en los sitios tetraédricos de la magnetita se alinean de forma que sus momentos magnéticos se oponen al campo magnético aplicado, pero los iones de los sitios octaédricos refuerzan el campo [Fig. 19-15(b)]. En consecuencia, el ion Fe^{3+} de un sitio tetraédrico neutraliza el ion Fe^{3+} del sitio octaédrico (los iones Fe^{3+} tienen un comportamiento antiferromagnético). Sin embargo, el ion Fe^{2+} del sitio octaédrico no encuentra oposición de ningún otro ion, lo que refuerza el campo magnético. El siguiente ejemplo muestra la forma de calcular la magnetización en el Fe_3O_4 , que es una de las ferritas.

EJEMPLO 19-7 Magnetización en la magnetita (Fe_3O_4)

Calcule el momento magnético total por centímetro cúbico en la magnetita. Calcule el valor de la densidad de flujo de saturación (B_{sat}) para este material.

SOLUCIÓN

En la subcelda [Fig. 19-15(b)], el momento magnético total es igual a cuatro magnetones de Bohr, obtenido a partir del ion Fe^{2+} , en vista de que los momentos magnéticos de los dos iones Fe^{3+} localizados en los sitios tetraédricos y octaédricos se cancelan entre sí.

Entre los imanes cerámicos duros que se utilizan como imanes permanentes, se incluye otra familia de óxidos complejos, las ferritas hexagonales. Entre éstas se encuentran el $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, el $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ y el $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$.

El siguiente ejemplo muestra la selección de un imán cerámico.

EJEMPLO 19-8 *Diseño y selección de materiales para un imán cerámico*

Diseñe un imán de ferrita cúbica que tenga un momento magnético total por metro cúbico de $5.5 \times 10^5 \text{ A/m}$.

SOLUCIÓN

En el ejemplo 19-7, vimos que el momento magnético por metro cúbico para el Fe_3O_4 es igual a $5.1 \times 10^5 \text{ A/m}$. Si deseamos obtener una magnetización de saturación más elevada, debemos reemplazar los iones Fe^{2+} con iones que tengan más magnetones de Bohr por átomo. Una de estas posibilidades es el Mn^{2+} (tabla 19-7), que tiene cinco magnetones de Bohr.

Suponiendo que la adición de dos iones Mn no afecta de manera apreciable el tamaño de la celda unitaria, encontramos, del ejemplo 19-7, que:

$$V_{\text{celda}} = 5.86 \times 10^{-22} \text{ cm}^3 = 5.86 \times 10^{-28} \text{ m}^3$$

Supongamos que x sea la fracción de iones Mn^{2+} que han reemplazado a los iones Fe^{2+} , que en este momento se han reducido a $1-x$. Entonces, el momento magnético total es:

Momento total

$$\begin{aligned} &= \frac{(8 \text{ subceldas}) \left[\frac{(x)(5 \text{ magnetones}) + (1-x)(4 \text{ magnetones})}{5.86 \times 10^{-28} \text{ m}^3} \right] (9.27 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2)}{5.86 \times 10^{-28} \text{ m}^3} \\ &= \frac{(8)(5x + 4 - 4x)(9.27 \times 10^{-24})}{5.86 \times 10^{-28}} = 5.5 \times 10^5 \\ x &= -4 + 4.346 = 0.346 \end{aligned}$$

Por tanto, necesitamos reemplazar 34.6 en porcentaje de átomos de los iones Fe^{2+} por iones Mn^{2+} para obtener la magnetización deseada.

Magnetostricción Ciertos materiales pueden desarrollar deformación al cambiar su estado magnético. Este efecto se utiliza en los accionadores. El efecto magnetostrictivo se puede observar modificando el campo magnético o modificando la temperatura.[6] El hierro, níquel, Fe_3O_4 , TbFe_2 , DyFe y SmFe_2 son ejemplos de algunos materiales que muestran este efecto. El Terfenol-D, que recibe su nombre en función de sus elementos constitutivos: el terbio (Tb), el hierro (Fe) y el disprosio (Dy) así como de su inventor, el Naval Ordnance Laboratory (NOL), es uno de los materiales magnetostrictivos más conocidos cuya composición es $\sim \text{Tb}_x\text{Dy}_{1-x}\text{Fe}_y$ ($0.27 < x < 0.30$, $1.9 < y < 2$). Este fenómeno de magnetostricción es análogo a la electrostricción. Recientemente, se han desarrollado algunas aleaciones ferromagnéticas que también muestran magnetostricción.

RESUMEN

- Todos los materiales interactúan con los campos magnéticos. Las propiedades magnéticas de los materiales están relacionadas con la interacción de los dipolos magnéticos y un campo magnético. Los dipolos magnéticos se originan con la estructura electrónica del átomo, generando varios tipos de comportamientos.

Coercitividad Campo magnético requerido para obligar o forzar los dominios en una dirección opuesta a la orientación de la magnetización. Ésta es una propiedad sensible a la estructura.

Diamagnetismo Efecto causado por el momento magnético debido al giro de los electrones en sus órbitas, el cual produce una ligera oposición al campo magnético impuesto.

Dominios Pequeñas regiones dentro de un material de un solo cristal o policristalino en las cuales todas las direcciones de magnetización están alineadas.

Ferrimagnetismo Comportamiento magnético que se obtiene cuando los iones en un material tienen sus momentos magnéticos alineados en un arreglo antiparalelo tal que los momentos no se cancelen totalmente entre sí, quedando una magnetización neta.

Ferromagnetismo Alineación de los momentos magnéticos de los átomos en la misma dirección, de manera que, después de eliminar el campo magnético impuesto, queda una pequeña magnetización neta.

Imán duro Material ferromagnético o ferrimagnético que tiene una coercitividad $> 10^4 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$.

Imán permanente Material magnético duro.

Imán suave Material ferromagnético o ferrimagnético que tiene una coercitividad de $\leq 10^3 \text{ Am}^{-1}$.

Magnetización El momento magnético total por unidad de volumen.

Magnetización de saturación Cuando todos los dipolos se han alineado con el campo, produciendo la magnetización máxima.

Magnetón de Bohr Intensidad del momento magnético de un electrón (μ_B) debida al giro de dicho electrón.

Momento magnético Intensidad del campo magnético asociada con un dipolo magnético.

Paramagnetismo Momento magnético neto causado por el alineamiento de los giros de los electrones al aplicar un campo magnético.

Paredes de Bloch Fronteras entre dominios magnéticos.

Permeabilidad magnética del vacío Relación entre la inductancia o magnetización y el campo magnético. Es una medida de la facilidad con que las líneas de flujo magnético pueden "fluir" a través de un material.

Potencia Intensidad de un imán permanente expresada por el producto máximo de la inductancia y el campo magnético.

Remanencia Polarización o magnetización que queda en un material después de que se ha retirado el campo. La remanencia se debe al alineamiento permanente de los dipolos.

Superparamagnetismo En el régimen a nanoescala, materiales que son ferromagnéticos o ferrimagnéticos, pero que se comportan de forma paramagnética (debido a sus granos o partículas de nanotamaño).

Susceptibilidad magnética Relación entre magnetización y el campo magnético aplicado.

Temperatura de Curie Temperatura (T_c) por arriba de la cual los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos se convierten en paramagnéticos.

1. JACOBY, M. "Data Storage: New Materials Push the Limits", *Chemical and Engineering News*, junio 12, 2000, p. 41.
2. SKOMSKI, R. y J.M.D. COEY. *Permanent Magnetism*, J.M.M. COEY y D.R. TILLEY, Eds., Institute of Publishing, 1999.
3. KASAP, S.O. *Principles of Electrical Engineering Materials and Devices*, Irwin, 1997.

- 19-10 ¿Cómo cambia la permeabilidad de los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos con la temperatura cuando ésta es superior a la temperatura de Curie?
- 19-11 Se debe producir una aleación de níquel y cobalto para obtener una magnetización de 2×10^6 A/m. La estructura del cristal de la aleación es FCC con un parámetro de red de 0.3544 nm. Determine el porcentaje atómico de cobalto que se requiere, suponiendo que no ocurre interacción alguna entre el níquel y el cobalto.
- 19-12 Estime la magnetización que se produciría en una aleación que contiene níquel y 70% de átomos de cobre, suponiendo que no ocurre interacción alguna.
- 19-13 Una aleación de Fe-80% Ni tiene una permeabilidad máxima de 300 000 cuando se obtiene una inductancia de 3 500 gauss. La aleación se coloca en una bobina de 20 vueltas de 2 cm de longitud. ¿Qué corriente debe fluir a través de los conductores de la bobina para obtener este campo?
- 19-14 Una aleación de Fe-49% Ni tiene una permeabilidad máxima de 64 000 cuando se le aplica un campo magnético de 0.125 oersted. ¿Qué inductancia se obtiene y qué corriente se necesita para llegar a esta inductancia en una bobina de 200 espiras y 3 cm de longitud?
- 19-15 Trace un esquema de los ciclos $B-H$ y $M-H$ para un material ferromagnético común. ¿Cuál es la diferencia entre estos dos ciclos?
- 19-16 ¿Es constante la permeabilidad magnética de un material ferromagnético o ferrimagnético? Explique.
- 19-17 Desde un punto de vista fenomenológico, ¿cuáles son las similitudes entre los elastómeros, los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos y los ferroeléctricos?
- 19-18 ¿Cuáles son las diferencias principales entre los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos?
- 19-19 Compare las resistividades eléctricas de los metales ferromagnéticos y los cerámicos ferrimagnéticos.
- 19-20 ¿Por qué son importantes las pérdidas por corrientes parásitas o de eddy en el diseño de los materiales ferromagnéticos, pero no tanto en los materiales ferrimagnéticos?
- 19-21 ¿Qué elemento tiene la magnetización de saturación más elevada? ¿Cuáles son las aleaciones con la más alta magnetización de saturación de entre todos los materiales?
- 19-22 ¿Qué material, entre todos los materiales magnéticos, tiene el producto de energía o potencia más elevado?
- 19-23 ¿Es la coercitividad de un material una propiedad sensible a la microestructura? ¿Es la remanencia una propiedad sensible a la microestructura? Explique.

- 19-24 ¿Es la magnetización de saturación una propiedad sensible a la microestructura? Explique.
- 19-25 ¿Puede un mismo material tener diferentes ciclos de histéresis? Explique.
- 19-26 Los siguientes datos describen el efecto del campo magnético en la inductancia de un acero al silicio. Calcule la permeabilidad inicial y la máxima del material.

H (A/m)	B (tesla)
0.00	0
20	0.08
40	0.30
60	0.65
80	0.85
100	0.95
150	1.10
250	1.25

- 19-27 Un material magnético tiene un campo coercitivo de 167 A/m, una magnetización de saturación de 0.616 tesla y una inductancia residual de 0.3 tesla. Haga un esbozo del ciclo de histéresis del material.
- 19-28 Un material magnético tiene un campo coercitivo de 10.74 A/m, una magnetización de saturación de 2.158 tesla y una inductancia residual de 1.183 tesla. Haga un esbozo del ciclo de histéresis del material.
- 19-29 Usando la figura 19.16, determine las propiedades siguientes del material magnético: remanencia, magnetización de saturación, campo coercitivo, permeabilidad inicial, permeabilidad máxima y potencia (producto BH máximo).

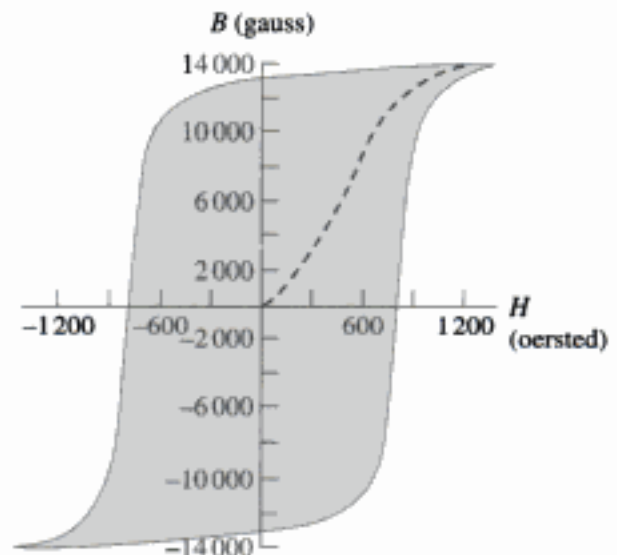


Figura 19-16 Curva de histéresis de un material magnético duro (para el problema 19-29).



Problemas de diseño

- 19-45 Diseñe un solenoide de una longitud no mayor de 1 cm que produzca una inductancia de 3 000 gauss.
- 19-46 Diseñe un imán permanente que tenga una remanencia de por lo menos 5 000 gauss y que no pueda ser desmagnetizado si se expone a una temperatura de 400°C o a un campo magnético de 1 000 oersted, y que tenga una buena potencia magnética.
- 19-47 Diseñe una ferrita de estructura en espinel que produzca un momento magnético total por metro cúbico $= 5.6 \times 10^5 \text{ A/m}$.

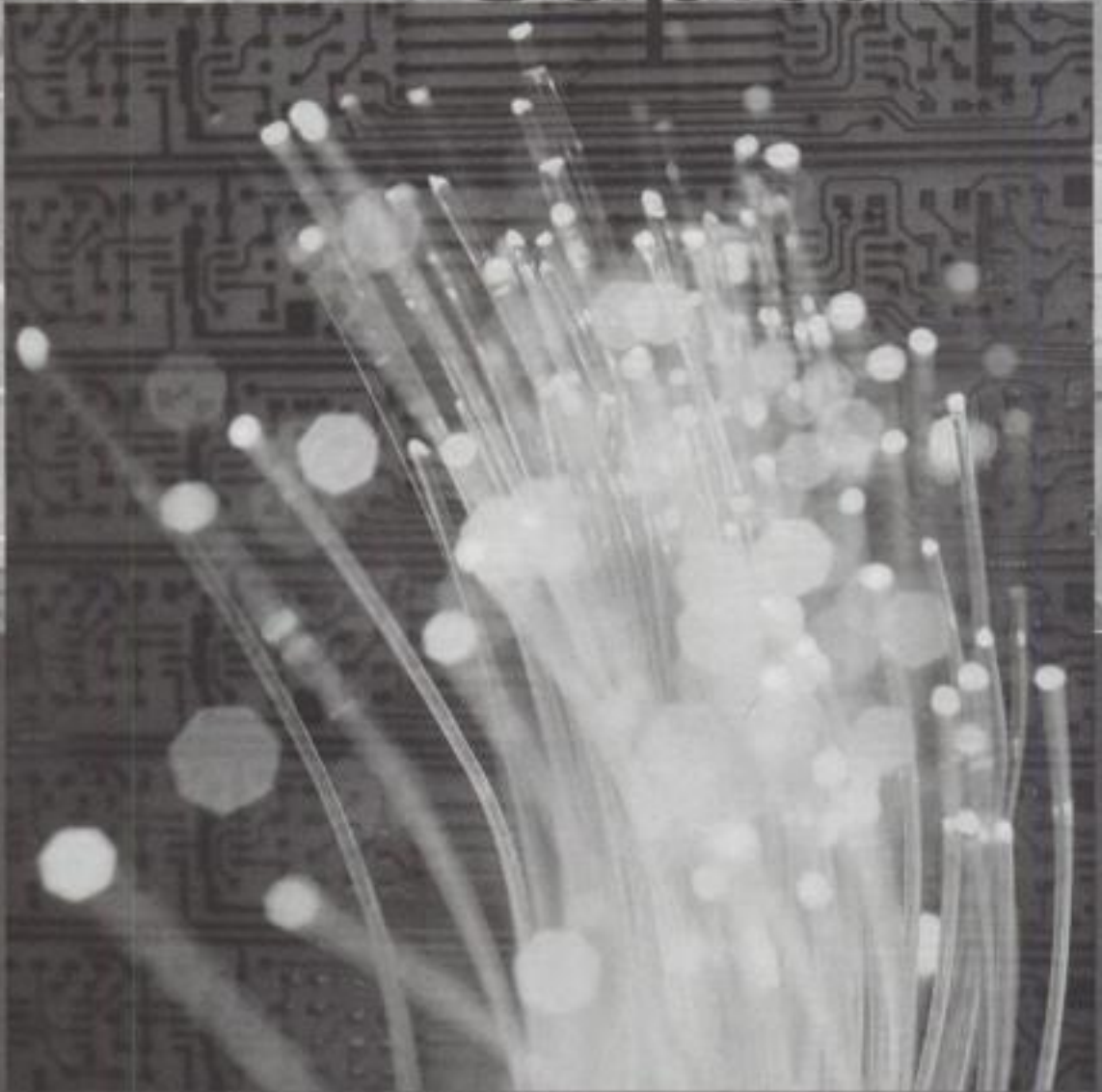
- 19-48 Diseñe una ferrita de estructura de espinel que produzca un momento magnético total por metro cúbico de $4.1 \times 10^5 \text{ A/m}$.



Problema en computadora

- 19-49 *Conversión de unidades magnéticas.* Escriba un programa de cómputo que convierta unidades magnéticas del sistema cgs, es decir de Gauss, al sistema SI. Por ejemplo, si el usuario da un valor de densidad de flujo en Gauss, el programa deberá proveer el valor correspondiente en Wb/m^2 o en tesla.

Capítulo



Los materiales con propiedades ópticas desempeñan un papel crítico en la infraestructura de nuestros sistemas de comunicaciones y de tecnología de la información. Existen en la actualidad más de diez millones de kilómetros de cable de fibras ópticas instalados en todo el mundo. Las fibras ópticas para aplicaciones en comunicaciones y en la medicina, los láser para aplicaciones médicas y de manufactura, los arreglos de espejos micromaquinados, los diodos emisores de luz y las celdas solares han permitido el desarrollo de una amplia gama de nuevas tecnologías. Esta fotografía muestra un arreglo micromaquinado de columnas de silicio formadas por ataque anisotrópico. Estos tipos de estructuras se conocen como *cristales fotónicos*. El desarrollo de dispositivos tan novedosos puede conducir a nuevos procedimientos respecto a la manera en que podemos manipular los fotones de una forma activa e integrar mejor la tecnología de los materiales semiconductores y ópticos. (Cortesía de PhotoDisc/Getty Images.)

Algunos de estos fueron analizados en el capítulo 18. Desde simples espejos, prismas y lentes hasta los últimos materiales fotónicos de brecha de banda, el campo de los materiales y dispositivos ópticos se ha desarrollado a un ritmo muy rápido. [2-4] El objetivo de este capítulo es presentar un resumen de los principios fundamentales que han servido de guía en las aplicaciones de los materiales ópticos.

Las propiedades ópticas de los materiales están relacionadas con la interacción entre el material y las radiaciones electromagnéticas en forma de ondas o de partículas de energía conocidas como **fotones**. Esta radiación puede tener características que caigan en el espectro de la luz visible o pueden resultar invisibles para el ojo humano. En este capítulo, exploraremos dos vertientes mediante las cuales podemos utilizar las propiedades ópticas de los materiales: emisiones de fotones de los materiales e interacción de fotones con los materiales. Diversas fuentes causan la emisión de fotones con una cierta frecuencia, como los materiales. Diversas fuentes causan la emisión de fotones con una cierta frecuencia.

Cuando los fotones interactúan con un material, se puede producir una diversidad de efectos ópticos, incluyendo la absorción, la transmisión, la dispersión, la difracción, la reflexión, la refracción y la generación de un voltaje. El examinar estos fenómenos no sólo nos permite comprender mejor el comportamiento de los materiales, sino también poder utilizarlos para producir cosas como aeronaves no detectables por el radar, láser para uso médico, comunicaciones o manufactura; dispositivos de fibras ópticas; diodos emisores de luz; celdas solares e instrumentos analíticos para determinar la estructura cristalina o la composición de los materiales.

El espectro electromagnético

20-1

La luz es energía, o radiación, en forma de ondas o partículas llamadas fotones que pueden ser emitidos de un material. Las características de importancia de los fotones —su energía E , su longitud de onda λ y la frecuencia ν — se relacionan entre sí mediante la ecuación

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (20-1)$$

donde c es la velocidad de la luz (en el vacío), la velocidad c_0 es de 3×10^{10} cm/s y h es la constante de Planck (6.62×10^{-34} J · s). Dado que por electrón volt (eV) existen 1.6×10^{-19} J, h también es igual a 4.14×10^{-15} eV · s. Esta ecuación nos permite pensar en el fotón ya sea como una partícula de energía E o como una onda con una longitud de onda λ y una frecuencia características.

El espectro de la radiación eléctrica aparece en la figura 20-1.[5] Los rayos gamma y los rayos X tienen una longitud de onda muy corta, es decir una alta frecuencia, y poseen energías muy elevadas; las microondas y las ondas de radio poseen energías muy reducidas; y la luz visible representa sólo una porción muy angosta del espectro electromagnético. La figura 20-1 también muestra la respuesta del ojo humano a diferentes colores. También se muestran las brechas de banda de energía (E_g) de los semiconductores en eV y las longitudes de onda correspondientes de la luz. Como se analizó en el capítulo 18, estas relaciones se utilizan para fabricar LED de diferentes colores.

se han instalado en todo el mundo más de 10 millones de kilómetros (~6.25 millones de millas) de fibras ópticas.[1] El término "óptica electrónica" se refiere a la ciencia y tecnología que combina materiales electrónicos y ópticos. Entre estos, debemos mencionar los diodos emisores de luz (LED, de *light emitting diodes*), las células solares y los láser semiconductores.

Los materiales fotónicos u ópticos han causado un impacto significativo en el desarrollo de la infraestructura de las comunicaciones y de la tecnología de la información. Los materiales fotónicos también han desempeñado un papel clave en muchas otras tecnologías relacionadas con la medicina, la fabricación y la astronomía, por mencionar algunas. En la actualidad,

- ...por qué el cielo se ve azul?
- ...cómo funciona una fibra óptica?
- ...qué factores controlan la transmisión y la absorción de la luz en los diferentes materiales?
- ...cuántas millas de fibras ópticas se han instalado a la fecha en todo el mundo?
- ...qué significan las siglas LASER
- ...de qué está hecho un láser de rubí?
- ...si la operación de un tubo de luz fluorescente incluye el efecto de la fosforescencia?

?Alguna vez se preguntó...

Materiales fotónicos

20

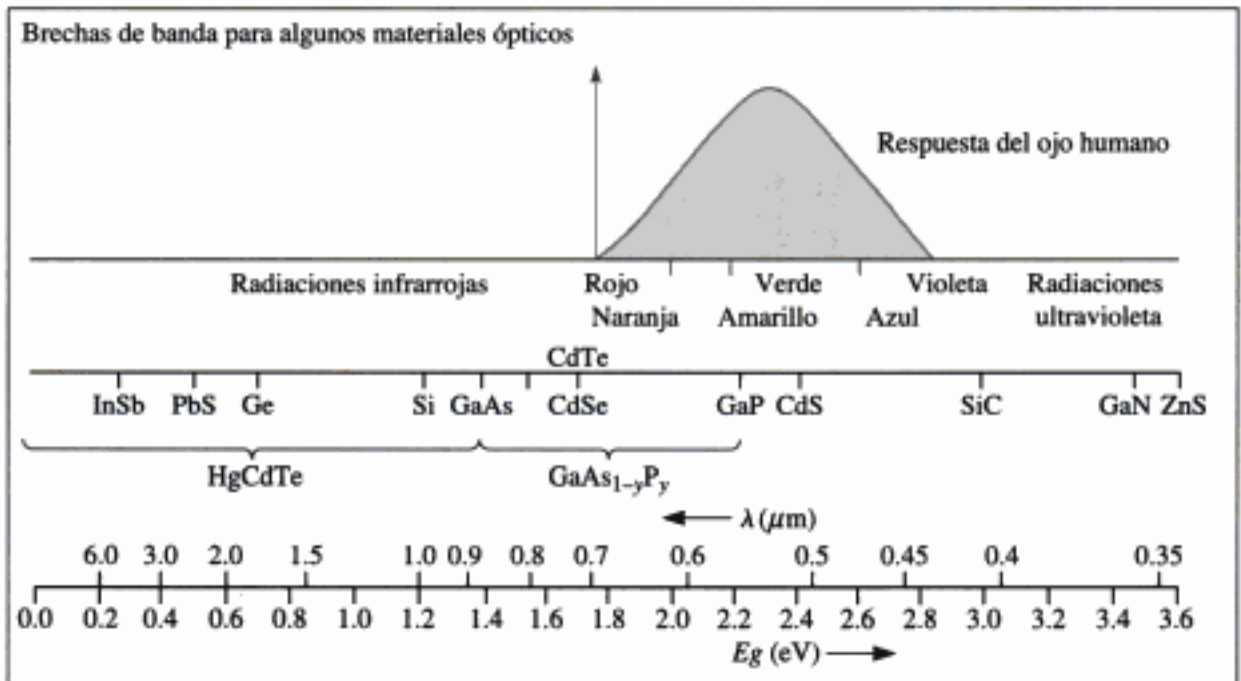
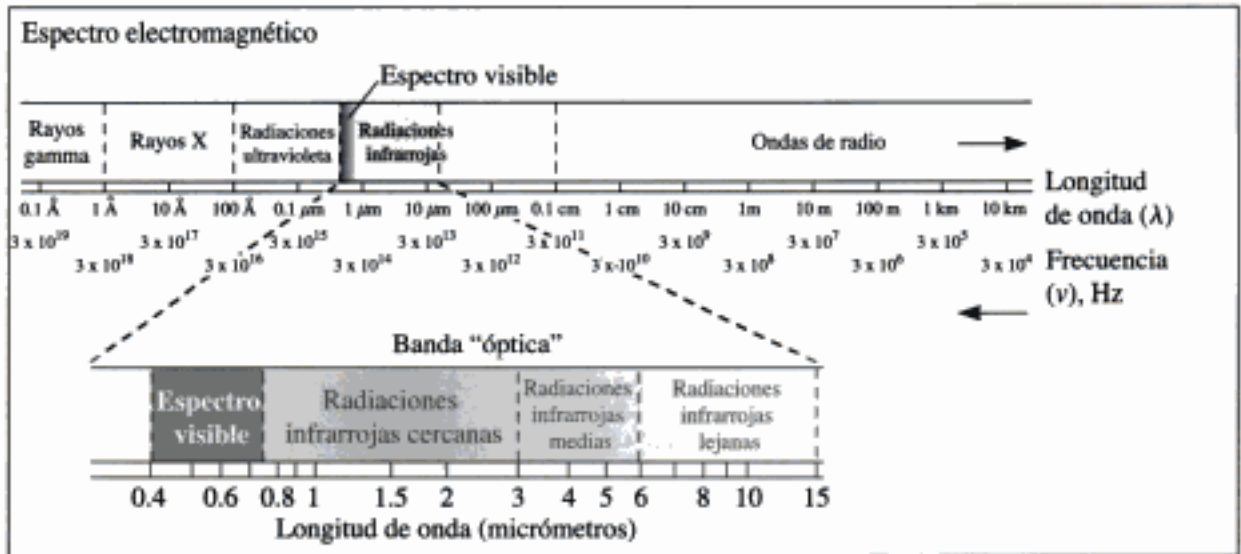


Figura 20-1 Espectro electromagnético de las radiaciones; también se muestran las brechas de banda de energía y las frecuencias de corte correspondientes a algunos materiales ópticos. (Fuente: *De Optoelectronics: An Introduction to Materials and Devices*, por J. Singh. Copyright © 1996. The McGraw-Hill Companies. Reproducido con autorización de The McGraw-Hill Companies.)

60° en relación con el eje de la fibra. De la figura 20-3(b), encontramos que $\theta_i = 90 - 60 = 30^\circ$. Si suponemos que el vidrio es el material 1 y si la fibra de vidrio es en el aire ($n = 1.0$), entonces con base en la ecuación 20-7a:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} \quad \text{o} \quad \frac{1}{1.5} = \frac{\sin 30^\circ}{\sin \theta_t}$$

$$\sin \theta_t = 1.5 \sin 30^\circ = 1.5(0.50) = 0.75 \quad \text{o} \quad \theta_t = 48.6^\circ$$

Dado que θ_t es inferior a 90° , los fotones se escapan de la fibra. Para evitar la transmisión, es preciso introducir los fotones en un ángulo menor, que dé $\theta_t = 90^\circ$.

$$\frac{1}{1.5} = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{\sin \theta_i}{\sin 90^\circ} = \sin \theta_i$$

$$\sin \theta_i = 0.6667 \quad \text{o} \quad \theta_i = 41.8^\circ$$

Si el ángulo entre el rayo y el eje de la fibra es $90 - 41.8 = 48.2^\circ$ o menos, el rayo se reflejará.

Si la fibra estuviera sumergida en agua ($n = 1.333$), entonces:

$$\frac{1.333}{1.5} = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{\sin \theta_i}{\sin 90^\circ} = \sin \theta_i$$

$$\sin \theta_i = 0.8887 \quad \text{o} \quad \theta_i = 62.7^\circ$$

En el agua, sería necesario introducir los fotones a un ángulo inferior a $90 - 62.7 = 27.3^\circ$, a fin de impedir la transmisión.

EJEMPLO 20-2 Transmisión de la luz en el polietileno

Suponga que un rayo de fotones en el vacío choca contra una hoja de polietileno a un ángulo de 10° en relación con la normal a la superficie del polímero. Calcule el índice de refracción del polietileno y determine el ángulo formado entre el rayo incidente y el rayo que atraviesa el polímero.

SOLUCIÓN

El índice de refracción está relacionado con la constante dieléctrica a alta frecuencia. En el caso de este material, la constante dieléctrica a alta frecuencia es $k_\infty = 2.3$:

$$n = \sqrt{k_\infty} = \sqrt{2.3} = 1.52$$

El ángulo θ_t es:

$$n = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t}$$

$$\sin \theta_t = \frac{\sin \theta_i}{n} = \frac{\sin 10^\circ}{1.52} = \frac{0.174}{1.52} = 0.114$$

$$\theta_t = 6.56^\circ$$

Reflexión Cuando un rayo de fotones choca contra un material, los fotones interactúan con los electrones de valencia y ceden su energía. En los metales, las bandas de valencia no están llenas y la radiación de casi cualquier longitud de onda excita a los electrones haciéndolos saltar a niveles más elevados de energía. Se esperaría que, si se absorben los fotones to-

fotones con una energía relativamente baja y las vibraciones o fotones de la red cristalina. Entonces, la transmisión en los materiales dieléctricos está circunscrita al lado superior de la longitud de onda debido a las vibraciones en la red del cristal. El corte de la longitud de onda del lado de las longitudes altas se incrementa al aumentar la masa iónica o atómica. Entonces, el vidrio KCl y GeO_2 se mantendrán transparentes para las longitudes de onda largas en comparación con el vidrio SiO_2 . Por lo tanto, para los materiales dieléctricos, existe una "ventana" a través de la cual la transmisión ocurre con facilidad. Esto ocurrirá entre las longitudes de onda que corresponden al margen de absorción óptico y al borde de longitud de onda superior dictado por las interacciones entre fonón y fotón. Sin embargo, en muchos casos la porosidad, las segundas fases o las impurezas pueden tener un efecto significativo sobre la absorción de la radiación en esta ventana de transparencia óptica. Estas ideas son importantes para el diseño de materiales que sean transparentes a ciertos rangos de radiaciones infrarrojas y de otros tipos.

La intensidad del rayo transmitido también depende de características microestructurales. En los materiales cerámicos, la porosidad dispersa a los fotones; incluso una pequeña cantidad de porosidad (menos de 1% en volumen) puede hacer que el material cerámico sea opaco. Por ejemplo, la alúmina, que tiene una densidad relativamente baja, es opaca; sin embargo, una alúmina de alta densidad es ópticamente transparente. Este material se utiliza con frecuencia en la manufactura de envolturas para lámpara. Los precipitados cristalinos, particularmente aquellos que tienen un índice de refracción muy distinto al material de la matriz, también causan dispersión. Estos *opacadores* cristalinos hacen que un vidrio que normalmente puede tener una buena transparencia se haga translúcido o incluso opaco. Por lo general, los poros o precipitados más pequeños causan una mayor reducción en la transmisión de la luz.

En los metales, el coeficiente de absorción tiende a ser grande [Fig. 20-6(a)], particularmente en el espectro de la luz visible. Dado que no existe una brecha de energía en los metales, cualquier fotón tiene, virtualmente, suficiente energía para excitar a los electrones hacia un nivel de energía más alto y absorber así la energía del fotón. Los materiales dieléctricos, por lo contrario, poseen una gran brecha de energía entre las bandas de valencias y de conducción. Si

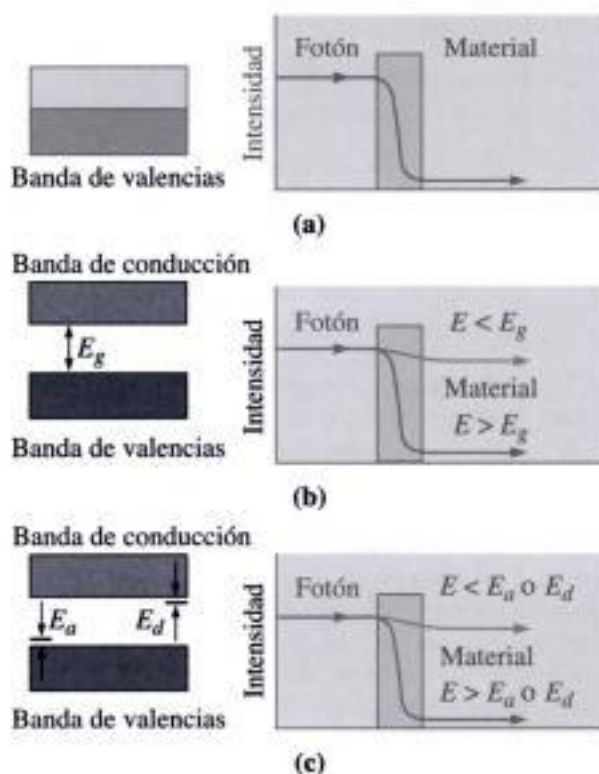


Figura 20-6
Relaciones entre la absorción y la brecha de energía: (a) metales, (b) materiales dieléctricos y semiconductores intrínsecos y (c) semiconductores extrínsecos.

Podemos utilizar este principio para los fotodetectores u “ojos electrónicos” que abren y cierran puertas o abren y cierran interruptores cuando se bloquea un haz de luz enfocado sobre un material semiconductor. La corriente también se intensifica.

Las **celdas solares** también utilizan la absorción de la luz para generar un voltaje [Fig. 20-7(b)]. Esencialmente, los portadores de carga generados por absorción óptica están separados, lo cual genera el desarrollo de un voltaje. Este voltaje crea un flujo de corriente en un circuito externo. Las celdas solares son uniones p - n diseñadas de forma que los fotones exciten a los electrones hacia la banda de conducción. Los electrones se mueven al lado n de la unión, en tanto que los huecos se trasladan al lado p . Este movimiento genera un voltaje de contacto debido al desequilibrio de la carga. Si el dispositivo de unión se conecta a un circuito eléctrico, la unión actúa como una batería para energizar al circuito. Las celdas solares aprovechan recubrimientos antirreflejantes de forma que se capten al máximo los elementos clave del espectro solar.

LEDs (o diodos emisores de luz) Como lo expusimos en el capítulo 18, la luz absorbida por un semiconductor de brecha de banda directa hace que los electrones sean promovidos a la banda de conducción. Cuando estos electrones regresan a la banda de brecha de valencias, se combinan con los huecos causando emisiones de luz. Se pueden utilizar muchas soluciones sólidas semiconductoras para tener brechas de banda diferentes y producir LEDs de distintos colores. Este fenómeno también se utiliza en los diodos emisores de luz y en los láser semiconductores (Fig. 20-8). El diseño de los LEDs se analizará posteriormente en este capítulo.

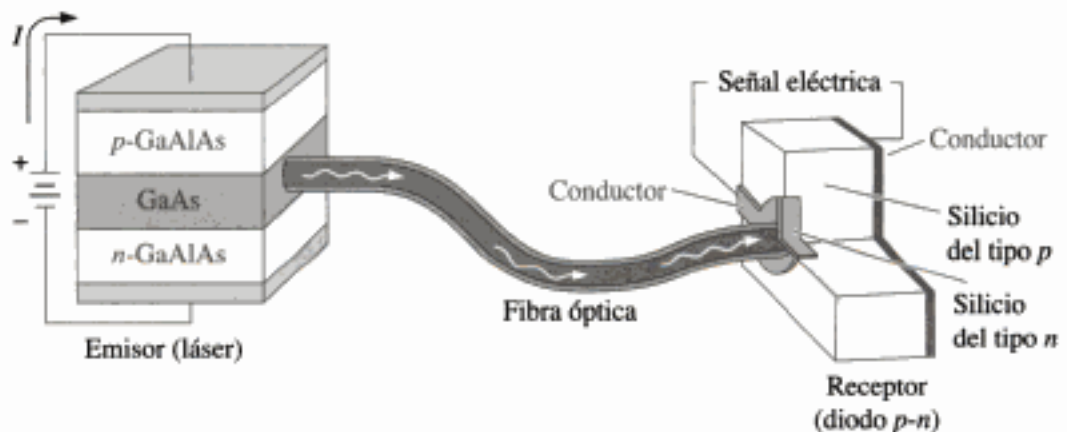


Figura 20-8 Los elementos de un sistema fotónico para transmitir información incluyen un láser o LED para generar fotones a partir de una señal eléctrica, fibras ópticas para transmitir con eficiencia el haz de fotones y un receptor LED para convertir de nuevo los fotones en una señal eléctrica.

El siguiente ejemplo ilustra aplicaciones de muchos de estos conceptos en relación con la absorción y la transmisión de la luz.

EJEMPLO 20-3 Determinación de brechas de energía críticas

Determine las brechas de energía críticas que proporcionan transmisión y absorción completa de fotones en el espectro visible.

SOLUCIÓN

El espectro de luz visible varía desde 4×10^{-5} hasta 7×10^{-5} cm. El E_g mínimo requerido para asegurar que ninguno de los fotones en el espectro visible es absorbido es:

$$E_s = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(3 \times 10^{10} \text{ cm/s})}{(4 \times 10^{-5} \text{ cm})(1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV})}$$

$$= 3.1 \text{ eV}$$

El E_s máximo por debajo del cual todos los fotones del espectro visible se absorben es:

$$E_s = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(3 \times 10^{10} \text{ cm/s})}{(7 \times 10^{-5} \text{ cm})(1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV})}$$

$$= 1.8 \text{ eV}$$

En el caso de materiales que tengan un E_s intermedio, solo se absorberá una porción de los fotones del espectro visible.

EJEMPLO 20-4 *Diseño de un escudo contra la radiación*

Un material tiene una reflectividad de 0.15 y un coeficiente de absorción (α) de 100 cm^{-1} . Diseñe un escudo que permita la transmisión de solo el 1% de la radiación incidente a través del material.

SOLUCIÓN

De la ecuación 20-11, la fracción de la intensidad incidente que se transmitirá es:

$$\frac{I_t}{I_0} = (1 - R)^2 \exp(-\alpha x)$$

$$0.01 = (1 - 0.15)^2 \exp(-100x)$$

$$\frac{0.01}{(0.85)^2} = 0.01384 = \exp(-100x)$$

$$\ln(0.01384) = -4.28 = -100x$$

$$x = 0.0428 \text{ cm}$$

El material debe tener un espesor de 0.0428 cm a fin de que solo transmita el 1% de la radiación incidente.

Si así lo deseáramos, podríamos determinar la cantidad de radiación que se pierde en cada paso:

$$\text{Reflexión en la cara anterior: } I_r = RI_0 = 0.15I_0$$

$$\text{Energía después de la reflexión: } I = I_0 - 0.15I_0 = 0.85I_0$$

$$\text{Energía después de la absorción: } I_a = (1 - R)I_0 \exp[(-100)(0.0428)] = 0.0118I_0$$

$$\text{Energía debida a la absorción: } 0.85I_0 - 0.0118I_0 = 0.838I_0$$

$$\text{Reflexión en la cara posterior: } I_r = R(1 - R)I_0 \exp(-\alpha x)$$

$$= (0.15)(1 - 0.15)I_0 \exp[-(100)(0.0428)] = 0.0018I_0$$

EJEMPLO 20-5 *Diseño de una aeronave "furtiva"*

Diseñe una aeronave que no pueda ser detectada por el radar.

SOLUCIÓN

El radar es una radiación electromagnética, normalmente en la porción de microondas del espectro. Para detectar una aeronave mediante el radar, alguna parte de la microonda debe ser reflejada por la aeronave y devuelta al receptor del radar. Se pueden tomar en consideración varios procedimientos para reducir la huella de radar proveniente de la aeronave:

1. Podríamos fabricar la aeronave partiendo de materiales transparentes al radar. Muchos polímeros, compuestos con matriz polimérica y materiales cerámicos satisfacen este requisito.
2. Podríamos diseñar la aeronave para que la señal de radar sea reflejada en ángulos muy obtusos en relación con la fuente. Esto se puede lograr utilizando superficies planas a más de 30° de la horizontal, o asegurándose de que todas las superficies sean curvas para ayudar a reflejar el radar en una diversidad de ángulos.
3. La estructura interna de la aeronave también puede fabricarse para absorber el radar. Por ejemplo, el uso de un material en panal en las alas puede hacer que las ondas de radar se reflejen repetidamente dentro del material. Los panales también pueden rellenarse con un material absorbente para acelerar la disipación de la energía del radar.
4. Podríamos hacer que la aeronave resulte menos visible seleccionando materiales con transiciones electrónicas de la misma energía que el radar. Esto se logra utilizando fibras de carbono en una matriz polimérica o compuestos carbono-carbono ubicados en lugares de alta temperatura de la aeronave. Recubrimientos que contengan ferritas cerámicas ferrimagnéticas aplicadas sobre la superficie del fuselaje absorben las ondas del radar y convierten esta energía en calor, pero estos materiales son muy pesados. Los materiales dieléctricos, que por lo común son más ligeros, se pueden diseñar para **absorber radiación de la frecuencia apropiada.**

20-4**Ejemplos y uso de los fenómenos de emisión**

Veamos algunos ejemplos particulares de los fenómenos de emisión que, por sí mismos, logran algunas funciones familiares e importantes.

Rayos gama—interacciones nucleares Los rayos gama, que son fotones de muy alta energía, son emitidos durante la descomposición radioactiva de los núcleos inestables de ciertos átomos. La energía en los rayos gama, por lo tanto, depende de la estructura del núcleo atómico y varía de un material a otro. Los rayos gama producidos de un material tienen longitudes de onda fijas. Cuando se descompone el cobalto 60, por ejemplo, se emiten rayos gama con energías de 1.17×10^6 y de 1.33×10^6 eV (es decir, longitudes de onda de 1.06×10^{-10} y 0.93×10^{-10} cm). Los rayos gama pueden utilizarse como fuente de radiación para detectar fallas que ocurren dentro de un material (una prueba no destructiva).

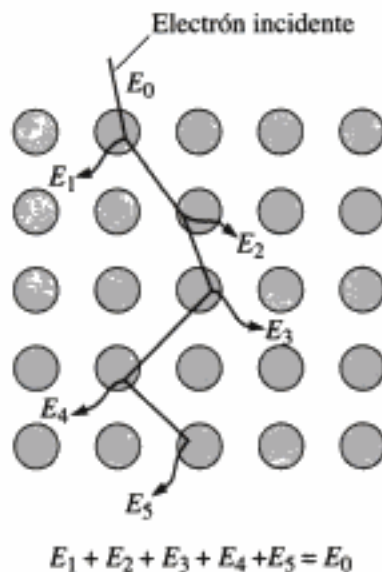


Figura 20-9

Cuando un electrón acelerado choca e interactúa con un material, su energía se puede reducir en una serie de pasos. En el proceso, se emiten varios fotones de energías diferentes E_1 hasta E_5 , cada uno de ellos con una longitud de onda única.

Rayos X—interacciones en las capas internas de los electrones Los **Rayos X**, que tienen una energía algo menor a la de los rayos gamma, se producen al estimular los electrones en las capas internas de un átomo. El estímulo puede ser de electrones de alta energía u otros rayos X. Al ocurrir la estimulación, se emiten rayos X de una amplia gama de energía. Se producen un espectro continuo y uno característico de los rayos X.

Suponga que un electrón de alta energía choca contra un material. Conforme el electrón se desacelera, se libera energía y se emite en forma de fotones. Cada vez que un electrón choca con un átomo, cede una parte mayor de su energía. Sin embargo, cada interacción puede ser más o menos severa, por lo que el electrón va cediendo una fracción distinta de su energía cada vez y produce fotones de longitudes de onda diferentes (Fig. 20-9). Se produce un **espectro continuo** (la porción lisa de las curvas de la figura 20-10). En el caso de que el electrón perdiera toda su energía en un solo impacto, la longitud de onda mínima de los fotones emitidos sería equivalente a la energía original del estímulo. Una longitud de onda mínima de rayos X producidos se conoce como **límite corto de longitud de onda** λ_{swl} . El límite corto

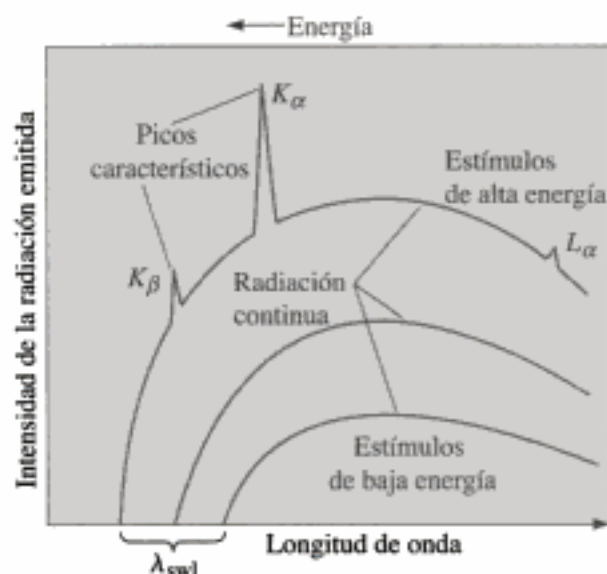


Figura 20-10

Espectros continuos y característicos de radiación emitida por un material. Los estímulos de baja energía producen un espectro continuo de fotones de baja energía y de longitud de onda larga. Cuando el estímulo es más poderoso, se emite un espectro más intenso y de energía más alta, hasta que, finalmente, se observa la radiación característica.

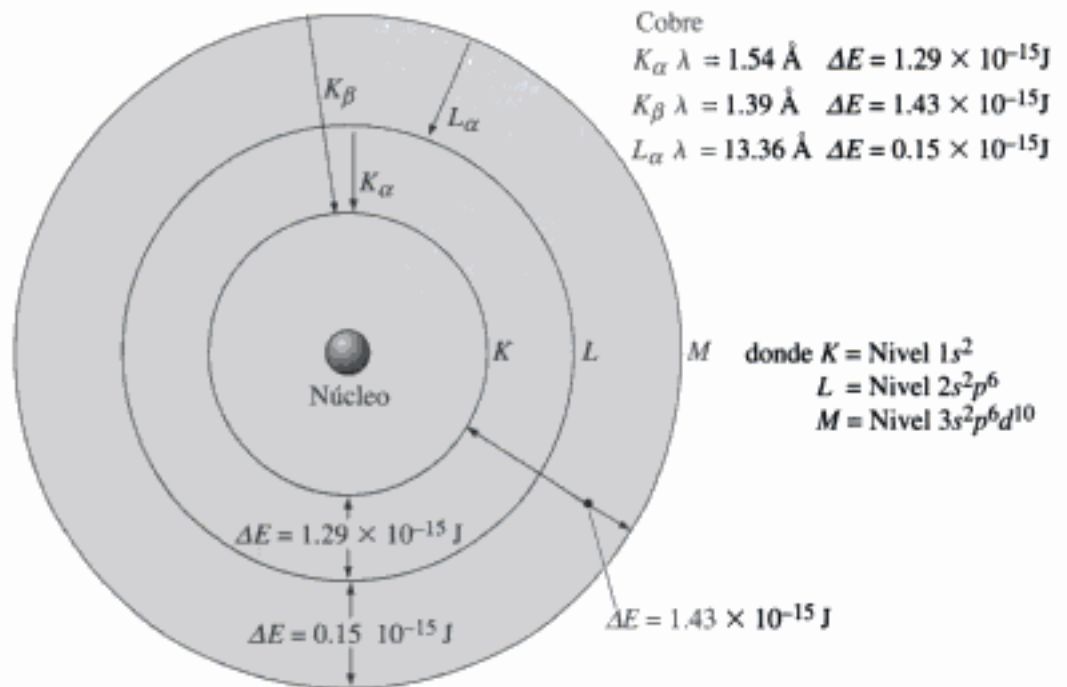


Figura 20-11 Cuando los electrones cambian de un nivel de energía a otro nivel inferior, se producen rayos X característicos, como se ilustra aquí para el cobre. La energía y la longitud de onda de los rayos X están fijadas por las diferencias de energía entre los niveles de energía.

de longitud de onda disminuye y, cuando aumenta la energía del estímulo, se incrementan el número y la energía de los fotones emitidos.

El estímulo incidente puede tener suficiente energía para excitar un electrón de una capa interna hacia una capa externa de energía. El electrón excitado no es estable y, para recuperar el equilibrio, el nivel energético "interior" o vacío se llena con electrones de un nivel superior. Este proceso lleva a la emisión de un **espectro característico** de rayos X que es distinto para cada tipo de átomo.

El espectro característico se produce porque existen diferencias discretas de energía entre dos niveles cualesquiera de energía. Cuando un electrón baja de un nivel a un segundo nivel inferior, se emite un fotón con esa energía y longitud de onda particulares. Este efecto se ilustra en la figura 20-11. Normalmente, nos referimos a los niveles de energía utilizando la designación $K, L, M, \dots$, como lo describimos en el capítulo 2. Si un electrón se excita partiendo del nivel K , este hueco puede llenarse con electrones de cualquier otro nivel. Normalmente, estos huecos se llenan con electrones provenientes de las capas más cercanas. Entonces, se emiten fotones con energías $\Delta E = E_K - E_L$ (rayos X K_{α}) o $\Delta E = E_K - E_M$ (rayos X K_{β}). Cuando un electrón de la capa M llena la capa L , se emite un fotón de energía $\Delta E = E_L - E_M$ (rayos X L_{α}); tiene una longitud de onda larga, o una baja energía. Obsérvese que es necesario un estímulo más energético para la producción de rayos X K_{α} que los necesarios para los rayos X L_{α} .

Como consecuencia de la emisión de electrones con una longitud de onda característica, sobre el espectro continuo se superpone una serie de picos (Fig. 20-10). Las longitudes de onda a las cuales se presentan dichos picos son específicas para el tipo de átomo (tabla 20-2). Por lo tanto, cada elemento produce un espectro característico diferente que nos sirve como "huella dactilar" para dicho tipo de átomo. Si hacemos coincidir las longitudes de onda características emitidas con las esperadas para diversos elementos, podemos determinar la identidad del material. También podemos medir la intensidad de los picos característicos. Al comparar las

intensidades medidas con las estándar, podemos estimar cuál es el porcentaje de cada tipo de átomo de material y entonces estimar la composición del mismo. Cuando un haz de electrones choca contra una muestra (como ocurre en un microscopio electrónico de transmisión o barrido), se puede analizar la energía o la longitud de onda de los rayos X emitidos, para obtener información química de la muestra. Esta técnica se conoce como análisis por dispersión de energía de rayos X (EDXA, de *energy dispersive x-ray analysis*). Los siguientes ejemplos ilustran la aplicación de las emisiones de rayos X utilizadas en las técnicas analíticas XRD (de *x-ray diffraction*) y EDXA.

EJEMPLO 20-6

Diseño y selección de materiales para un filtro de rayos X

Diseñe un filtro que absorba de manera selectiva emisiones K_β de rayos X del espectro del níquel, pero que permita pasar con poca absorción las emisiones K_α de dicho material. Este tipo de filtro se utiliza en el análisis de materiales por difracción de rayos X (XRD).

SOLUCIÓN

Al determinar una estructura cristalina o al identificar materiales desconocidos mediante diversas técnicas de difracción de rayos X, es preferible utilizar rayos X de una sola longitud de onda. Si se encuentran presentes los dos picos característicos K_α y K_β e interactúan con el material, el análisis resulta mucho más difícil.

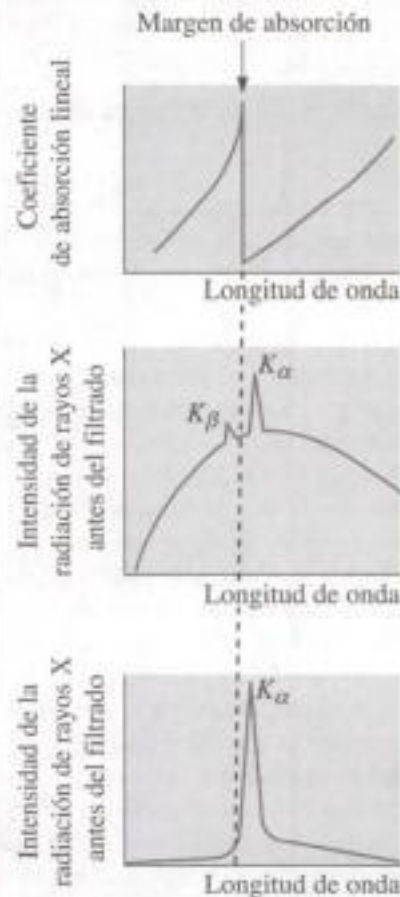


Figura 20-12

Los elementos tienen una carencia selectiva de absorción a determinadas longitudes de onda. Si se selecciona un filtro que tenga un margen de absorción entre los picos K_α y K_β de un espectro de rayos X, se absorberán todos los rayos X a excepción de K_α (para el ejemplo 20-6).

De forma similar, se pueden encontrar las energías y longitudes de onda de los demás picos. Estas longitudes de onda se comparan con las de la tabla 20-2, y se puede encontrar la identidad de los elementos, según se resume en la siguiente tabla:

Fase	Energía pico	λ	λ (Tabla 20-2)	Línea
A	1.5 keV	8.275 Å	8.337 Å	K_{α} Al
	1.5 keV	8.275 Å	8.337 Å	K_{α} Al
B	1.7 keV	7.30 Å	7.125 Å	K_{α} Si
	1.5 keV	8.275 Å	8.337 Å	K_{α} Al
C	1.7 keV	7.30 Å	7.125 Å	K_{α} Si
	5.8 keV	2.14 Å	2.104 Å	K_{α} Mn
	6.4 keV	1.94 Å	1.937 Å	K_{α} Fe
	7.1 keV	1.75 Å	1.757 Å	K_{β} Fe

Entonces, la fase A parece ser la matriz de aluminio; la B, una acícula de silicio (quizás con algo de aluminio); y la fase C, un compuesto Al-Si-Mn-Fe. De hecho, se trata de una aleación de aluminio y silicio. El aluminio y el silicio son las fases estables, con inclusiones de manganeso y hierro presentes en forma de impurezas.

Luminiscencia—interacciones de las capas externas de electrones En tanto que los rayos X se producen por las transiciones de electrones en los niveles inferiores de energía de un átomo, la **luminiscencia** es la conversión de radiaciones y otras formas de energía en luz visible. La luminiscencia ocurre cuando una radiación incidente excita electrones de la banda de valencias para pasar a través de la brecha de energía y llegar a la banda de conducción. Los electrones excitados se quedan sólo brevemente en los niveles superiores de energía. Cuando regresan a la banda de valencias, emiten fotones. Si la longitud de onda de estos fotones está en el espectro de luz visible, se presenta la luminiscencia.

La luminiscencia no se presenta en los metales. Simplemente los electrones son excitados a niveles más altos de energía dentro de la banda de valencias no enteramente ocupada y, cuando éstos regresan al nivel inferior, el fotón producido tiene una energía muy reducida y una longitud de onda superior a la de la luz visible [Fig. 20-14(a)].

Sin embargo, en ciertos materiales cerámicos y semiconductores, la brecha de energía entre las bandas de valencias y de conducción es tal que un electrón que pase a través de la misma producirá un fotón en el rango visible del espectro. En estos materiales luminiscentes, se observan dos efectos diferentes: la fluorescencia y la fosforescencia. En la **fluorescencia**, todos los electrones excitados vuelven a la banda de valencias, emitiendo los fotones correspondientes después de un muy breve lapso de tiempo ($\sim 10^{-8}$ segundos) después de haber desaparecido el estímulo [Fig. 20-14(b)]. Predomina una longitud de onda que corresponde a la brecha de energía E_g . En muchas técnicas avanzadas en bioquímica y en ingeniería biomédica, se utilizan tintes fluorescentes y microscopía fluorescente.[8] Para el análisis químico de los materiales se utiliza ampliamente la fluorescencia de rayos X (XRF, de *x-ray fluorescence*).

Los materiales **fosforescentes** contienen impurezas que introducen un nivel de donante dentro de la brecha de energía [Fig. 20-14(c)]. Los electrones excitados bajan primero al nivel de donante y quedan atrapados. Los electrones deben entonces escapar de la trampa antes de volver a la banda de valencias. Existe un retardo antes de que se emitan los fotones. Cuando se elimina la fuente, los electrones en las trampas se van escapando gradualmente y emiten luz durante un periodo adicional de tiempo. La intensidad de la luminiscencia está dada por

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\frac{t}{\tau}, \quad (20-13)$$

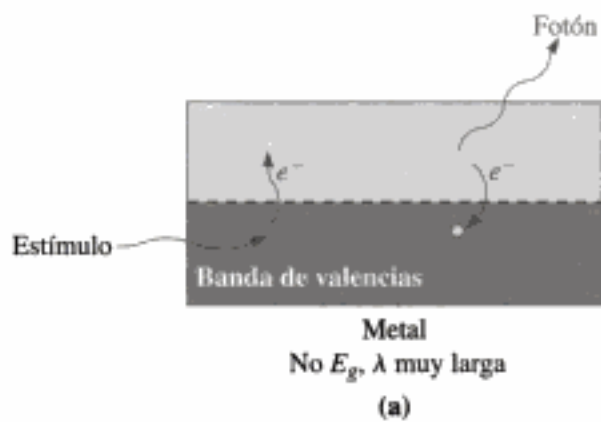
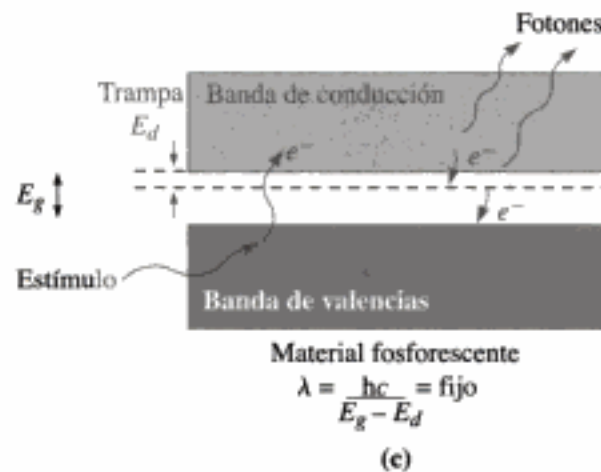
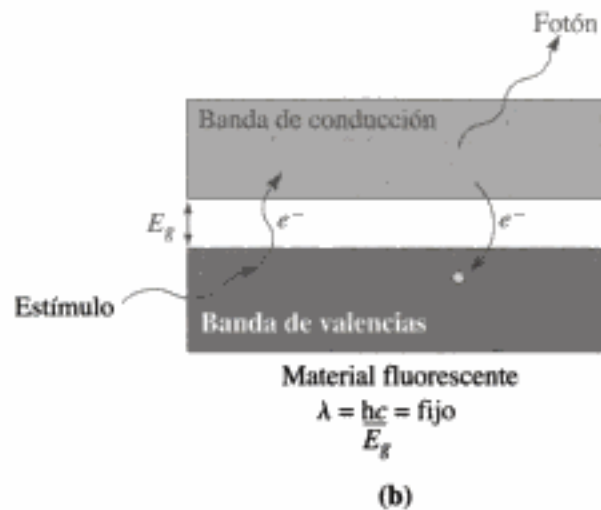


Figura 20-14

La luminiscencia se presenta cuando los fotones tienen una longitud de onda dentro del espectro visible.

(a) En los metales no existe una brecha de energía, por lo que no ocurre este fenómeno. (b) La fluorescencia se presenta cuando existe una brecha de energía. (c) La fosforescencia se presenta cuando se emiten fotones durante un cierto periodo de tiempo, debido a trampas de donadores en la brecha de energía.



donde τ es el **tiempo de relajación** y es una constante del material. Después del tiempo t posterior a la eliminación de la fuente, la intensidad de la luminiscencia se reducirá de I_0 a I . Los materiales fosforescentes son de gran importancia para la operación de las pantallas de televisión. En este caso, el tiempo de relajación no debe ser demasiado largo o, de lo contrario, las imágenes empezarán a superponerse. En la televisión a color, se utilizan tres tipos de materiales fosforescentes; se diseñan las brechas de energía de manera que se produzcan los colores rojo, verde y azul. Las pantallas de los osciloscopios y del radar se basan en este mismo

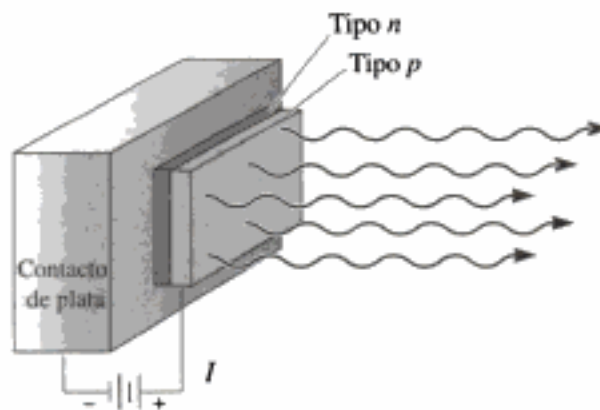


Figura 20-15

Diagrama de un diodo emisor de luz (LED). Un voltaje de polarización directa aplicado a través de la unión $p-n$ produce fotones.

idéntica longitud de onda.[9] En consecuencia, ocurre una gran amplificación de los fotones emitidos en el material. Mediante una selección adecuada del estimulante y del material, la longitud de onda de los fotones puede resultar en el rango visible. La salida del láser es un haz de fotones que están paralelos y de la misma longitud de onda y, por lo tanto, son coherentes. En un haz *coherente*, la naturaleza ondulatoria de los fotones está en fase, por lo que no ocurre una interferencia destructiva. Los láser son útiles en el tratamiento térmico y en la fusión de los metales, en la soldadura, en la cirugía, en el mapeo, transmisión y procesamiento de la información, y en una diversidad de otras aplicaciones, incluyendo la lectura de los discos compactos utilizados para producir grabaciones en estéreo libres de ruido.

Se utilizan varios tipos de materiales para producir los láser. El rubí, que es un cristal único de Al_2O_3 dopado con una pequeña cantidad de Cr_2O_3 (emite a $6943 \text{ \AA}$), y el granate de aluminio itrio ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ YAG) dopado con neodimio (Nd) (emite a $1.06 \mu\text{m}$) son dos láser de estado sólido comunes. Otros láser se basan en el gas CO_2 .

También se utilizan láser semiconductores, como los basados en las soluciones sólidas de GaAs, que tiene una brecha de energía correspondiente a una longitud de onda en el rango visible (Fig. 20-1). La figura 20-17 ilustra la forma en que operaría un láser semiconductor.

El proceso láser

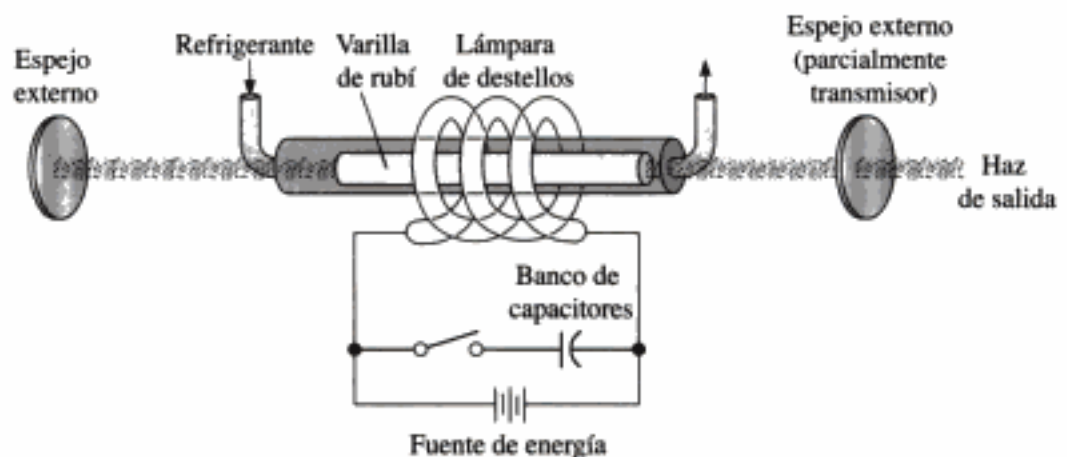


Figura 20-16 El láser convierte un estímulo en un haz de fotones coherentes. El espejo en uno de los lados refleja al 100%, y el espejo del lado opuesto transmite solo parcialmente. (Fuente: De *Optical Materials: An Introduction to Selection and Application*, por S. Musikan, p. 201, fig. 10-1. Copyright © 1985. Marcel Dekker, Inc.)

✓ PROBLEMAS

Sección 20-1 El espectro electromagnético

Sección 20-2 Refracción, reflexión, absorción y transmisión

- 20-1 Dé las definiciones de índice de refracción y de coeficiente de absorción. Compárelas con las definiciones de constante dieléctrica, factor de pérdidas, módulo de Young y deformación viscosa.
- 20-2 ¿Qué es la ley de Snell? Ilustre mediante un diagrama.
- 20-3 ¿De qué depende el índice de refracción de un material?
- 20-4 ¿Qué es "cristal de plomo"? ¿Qué es lo que hace que el índice de refracción de este material sea mucho más elevado que el del vidrio de silicato común y corriente?
- 20-5 ¿Qué mecanismo de polarización afecta al índice de refracción?
- 20-6 ¿Por qué es menor el índice de refracción del hielo que el del agua?
- 20-7 ¿Qué es dispersión? ¿Cuál es la importancia de la dispersión en los sistemas de fibras ópticas?
- 20-8 ¿Cuáles son los factores que limitan la transmisión de la luz a través de los materiales dieléctricos?
- 20-9 ¿Cuál es el principio subyacente para la operación de los LEDs y de las celdas solares?
- 20-10 Un haz de fotones choca contra un material en un ángulo de 25° en relación con la normal de la superficie. ¿Cuáles de los materiales de la lista proporcionada en la tabla 20-1, si es que hay alguno, podría hacer que el haz de fotones avance en un ángulo de 18 a 20° en relación con la normal de la superficie del material?
- 20-11 Un rayo láser que pasa a través del aire golpea un bloque de poliestireno de 5 cm de espesor a un ángulo de 20° en relación con la normal del bloque. ¿En qué distancia cambiará de lugar el rayo en relación con su trayectoria original cuando alcance el lado opuesto del bloque?
- 20-12 Un haz de fotones pasa a través del aire y choca contra un vidrio de sosa y cal que forma parte de un acuario que contiene agua. ¿Cuál es la fracción del haz que se refleja en la cara anterior del vidrio? ¿Qué fracción del haz remanente se refleja de la cara posterior del vidrio?
- 20-13 Encontramos que el 20% de la intensidad original de un haz de fotones se transmite desde el aire a través de un material de 1 cm de espesor con una constante dieléctrica de 2.3 y luego regresa al aire. Determine la fracción del haz que se

- b) absorbe en el material y
c) refleja en la superficie posterior.

Determine el coeficiente de absorción lineal de los fotones en el material.

- 20-14 Un haz de fotones en el aire golpea un material compuesto formado por una hoja de 1 cm de espesor de polietileno y una hoja de 2 cm de espesor de vidrio de cal y sosa. El haz incidente forma un ángulo de 10° con la normal del material compuesto. Determine el ángulo del haz con respecto a la normal de la fracción que
- a) pasa a través del polietileno,
b) pasa a través del vidrio y
c) pasa a través del aire del lado opuesto del material compuesto.
- ¿En qué distancia se habrá desplazado el haz de su trayectoria original cuando emerge del lado opuesto del material compuesto?
- 20-15 Una fibra de vidrio ($n = 1.5$) está recubierta con Teflón. Calcule el ángulo máximo en que se puede desviar un haz de luz en relación con el eje de la fibra sin escapar de la porción interna de la fibra.
- 20-16 Un material tiene un coeficiente de absorción lineal de 591 cm^{-1} para fotones de una longitud de onda en particular. Determine el espesor del material requerido para absorber el 99.9% de los fotones.

Sección 20-3 Absorción, transmisión o reflexión selectiva

- 20-17 ¿Qué es un vidrio fotocromático?
- 20-18 ¿Cómo se producen los vidrios de color?
- 20-19 ¿De qué está constituido el rubí?

Sección 20-4 Ejemplos y uso de los fenómenos de emisión

- 20-20 ¿Cuál es el principio de operación del análisis por dispersión de energía de rayos X (EDXA, por sus siglas en inglés)?
- 20-21 ¿Qué es la fluorescencia? ¿Qué es la fosforescencia?
- 20-22 ¿Qué significa XRF?
- 20-23 ¿Cómo funciona una lámpara fluorescente?
- 20-24 ¿Qué es electroluminiscencia?
- 20-25 El tungstenato de calcio (CaWO_4) tiene un tiempo de relajación de 4×10^{-6} s. Determine el tiempo requerido para que la intensidad de este material fosforescente se reduzca hasta el 1% de la intensidad original después de haber eliminado el estímulo.
- 20-26 La intensidad de la radiación proveniente de un material fosforescente disminuye hasta 90% de su valor

original después de transcurrir 1.95×10^{-7} s. Determine el tiempo requerido para que se reduzca la intensidad hasta el 1% de la original.

- 20-27 ¿Qué es un láser?
- 20-28 ¿Por qué en un láser de estado sólido uno de los espejos es parcialmente transmisor?
- 20-29 ¿Qué colores emiten un láser de rubí y uno de Nd:YAG?
- 20-30 Dopando de manera apropiada un granate de aluminio itrio con neodimio, los electrones se excitan dentro de la capa $4f$ de energía en los átomos de Nd. Determine la energía de transición aproximada si el Nd:YAG sirve como láser, produciendo una longitud de onda de 532 nm. ¿De qué color sería el rayo láser?
- 20-31 Determine si un haz incidente de fotones con una longitud de onda de $7\,500\text{ \AA}$ causará luminiscencia en los materiales siguientes (véase el capítulo 18):
- ZnO
 - GaP
 - GaAs
 - GaSb
 - PbS
- 20-32 Determine la longitud de onda de los fotones que se producen cuando los electrones excitados hacia la banda de conducción del silicio dopado con indio:
- bajan de la banda de conducción hacia la banda del aceptante y
 - después bajan de la banda del aceptante hasta la banda de valencias (véase el capítulo 18).
- 20-33 ¿Cuáles de los materiales compuestos semiconductores de la lista del capítulo 18, si es que existe alguno, son capaces de producir un rayo láser infrarrojo?
- 20-34 Diga qué tipo de radiación electromagnética (ultravioleta, infrarroja, visible) se produce partiendo de
- germanio puro y
 - germanio dopado con fósforo (véase el capítulo 18).
- 20-35 ¿Cuáles de los materiales dieléctricos de la lista del capítulo 18, si es que existe alguno, reduciría la velocidad de la luz en el aire de $3 \times 10^{10}\text{ cm/s}$ a menos de $0.5 \times 10^{10}\text{ cm/s}$?
- 20-36 ¿Qué material filtrante utilizaría usted para aislar el pico K_α de los rayos X de los siguientes elementos: hierro, manganeso, níquel? Explique su respuesta.
- 20-37 ¿Qué voltaje debe ser aplicado a un filamento de tungsteno para producir un espectro continuo de rayos X con una longitud de onda mínima de 0.09 nm ?
- 20-38 Un filamento de tungsteno se calienta utilizando una alimentación de $12\,400\text{ V}$. Diga cuál es
- la longitud de onda y
 - la frecuencia de los rayos X de más alta energía que se producen.

20-39 ¿Cuál es el voltaje mínimo necesario para producir la emisión K_α de rayos X en el níquel?

20-40 Con base en los rayos X característicos emitidos, determine la diferencia en energía entre los electrones en el tungsteno para

- las capas K y L
- las capas K y M y
- las capas L y M .

20-41 La figura 20-22 muestra los resultados de un análisis de rayos X fluorescentes, en el cual la energía de los rayos X emitidos por el material se trazan en función de sus longitudes de onda. Determine

- el voltaje de aceleración utilizado para producir los rayos X excitantes y
- la identidad de los elementos de la muestra.

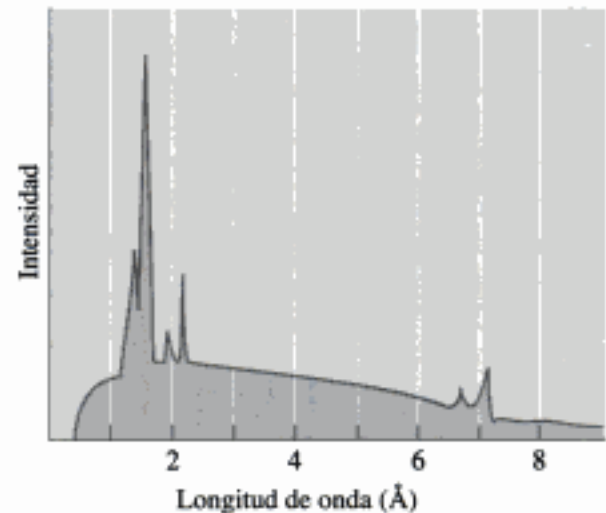


Figura 20-22 Resultados de un análisis por fluorescencia de rayos-X de una muestra de un metal desconocido (para el problema 20-41).

20-42 La figura 20-23 muestra las energías de los rayos X producidos en un análisis por dispersión de energía de la radiación emitida por un espécimen en un microscopio electrónico de barrido. Determine la identidad de los elementos en la muestra.

20-43 La figura 20-24 muestra la intensidad en función de la longitud de onda de la radiación obtenida por un tubo generador de rayos X de cobre. La tabla siguiente muestra el coeficiente de absorción lineal para varias longitudes de onda de un filtro de níquel. Si el filtro de Ni tiene un espesor de 0.005 cm , calcule y trace la intensidad del haz de rayos X transmitido en función de la longitud de onda.

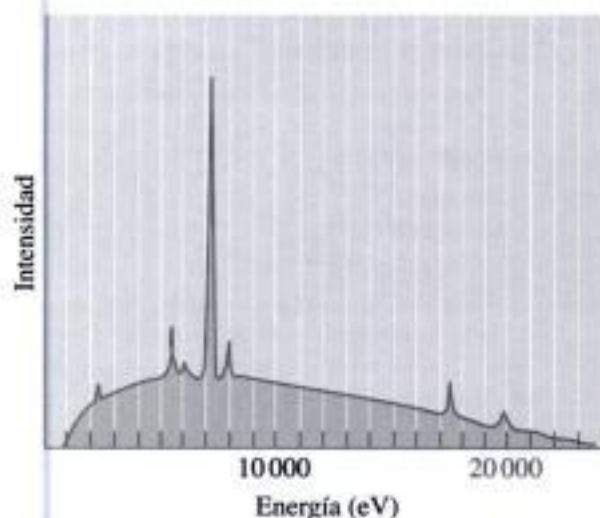


Figura 20-23 Espectro de emisión de rayos X (para el problema 20-42).

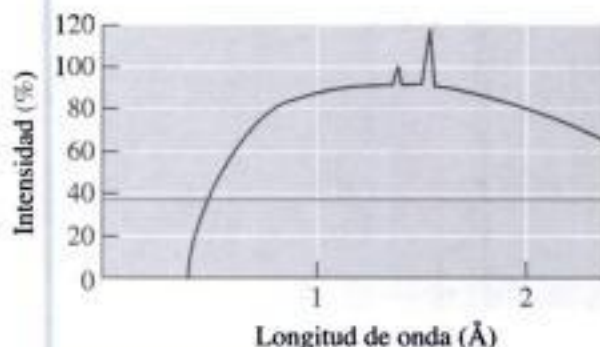


Figura 20-24 Intensidad del espectro inicial de una fuente de rayos X de cobre antes de filtrar (para el problema 20-43).

Longitud de onda Å	Coefficiente de absorción lineal (cm^{-1})
0.711	422
1.436	2900
1.542	440
1.659	543
1.790	670
1.937	830
2.103	1030
2.291	1300

Sección 20-5 Sistemas de comunicaciones por fibras ópticas

- 20-44 ¿Cuál es el principio mediante el cual se transmite la información vía una fibra óptica?
- 20-45 Dibuje un esquema de una fibra óptica de índice en escalón. Explique la forma en que la reflexión interna total mantiene la luz dentro de la fibra.

- 20-46 ¿Qué es una fibra IRG? Explique la manera en que el perfil del índice de refracción en una fibra IRG acepta distintos ángulos de incidencia.
- 20-47 ¿Cuál es el material que se utiliza en la fabricación de la mayoría de las fibras ópticas? ¿De qué está hecho el recubrimiento? ¿Qué material se utiliza para mejorar el índice de refracción del núcleo?
- 20-48 ¿Por qué están las fibras ópticas recubiertas con un polímero?
- 20-49 ¿Cuál es el papel que desempeña el vapor de agua en la determinación de las pérdidas ópticas y en la resistencia mecánica de las fibras ópticas?
- 20-50 En un sistema de fibras ópticas, ¿cómo se convierte o modula una señal eléctrica en una onda óptica?
- 20-51 En un sistema de fibras ópticas, ¿cómo se convierte la señal óptica en una señal eléctrica?
- 20-52 ¿La fibra óptica es un dispositivo activo o pasivo? Explique.
- 20-53 ¿Qué es un material con brecha de banda fotónica?



Problemas de diseño

- 20-54 Se deben generar rayos X de níquel dentro de un recipiente que los emitirá hacia el exterior a través de una pequeña ranura. Diseñe un recipiente que asegure que no más de 0.01% de la emisión K_α de los rayos X del níquel escape a través de las demás paredes del recipiente, sin embargo el 95% de dicha emisión pase a través de una delgada ventana que cubre la ranura. Los datos siguientes dan los coeficiente de absorción de masa de varios metales para la emisión K_α de rayos X del níquel. El coeficiente de absorción de masa α_m es igual a α/ρ , siendo α el coeficiente de absorción de masa lineal, y ρ , la densidad del material filtrante.

Material	α_m (cm^2/g)
Be	1.8
Al	58.4
Ti	247.0
Fe	354.0
Co	54.4
Cu	65.0
Sn	322.0
Ta	200.0
Pb	294.0

- 20-55 Diseñe un método mediante el cual se pueda utilizar un material fotoconductor para medir la temperatura de un material partiendo de la emisión térmica del mismo.

- 20-56 Diseñe un método, basado en las características de refracción de un material, que haga que un haz de fotones que originalmente está a 2° en relación con la normal sea desplazado de su trayectoria original 2 cm a una distancia de 50 cm del mismo.
- 20-57 En las máquinas fotocopadoras se utiliza selenio amorfo. Lleve a cabo una búsqueda en la literatura y averigüe cómo funciona el selenio amorfo en esa aplicación.
- 20-58 Diseñe un satélite de 3 pies de diámetro que aloje un detector de rayos infrarrojos y que deberá ser colocado en una órbita baja de la Tierra y que no sea detectado por el radar.



Problema en computadora

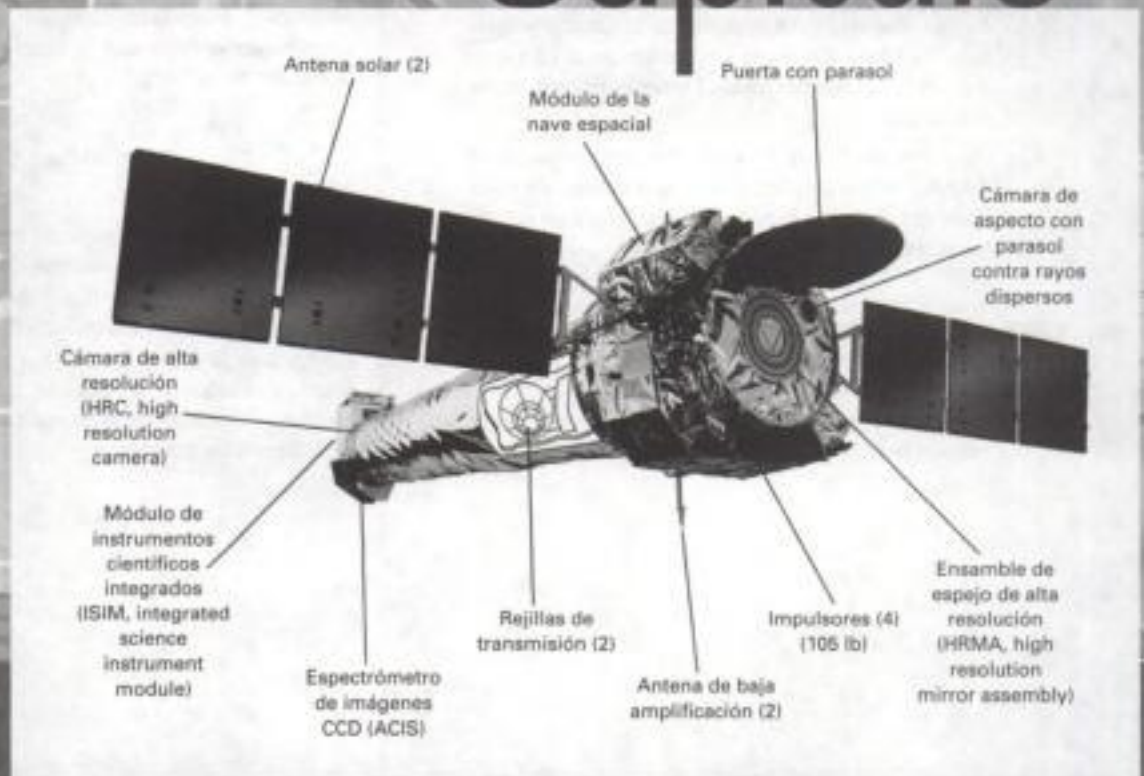
- 20-59 *Cálculo de la potencia en decibels.* En un sistema de comunicación óptico o en un sistema de transmisión

de energía eléctrica, la energía o señal se transfiere con frecuencia entre varios componentes. El decibel (dB) es una unidad conveniente para medir los niveles relativos de la potencia. Si la potencia de entrada a un dispositivo es P_1 y la potencia de salida es P_2 , entonces P_2/P_1 es la relación de potencia transmitida y representa la eficiencia. Esta relación en decibels se escribe de la forma:

$$\text{dB} = 10 \log \frac{P_2}{P_1}.$$

La potencia debe expresarse en unidades similares. Escriba un programa de computadora que calcule el valor en dB para la transmisión de energía entre dos componentes de un sistema de fibras ópticas (por ejemplo, de la fuente luminosa a la fibra). Después amplíe este cálculo para tres componentes (por ejemplo, luz transmitida de la fuente a la fibra y después de la fibra a un detector).

Capítulo



Las propiedades térmicas de los materiales desempeñan un papel de gran importancia en muchas tecnologías. De los materiales refractarios que se utilizan en la producción de metales hasta los recubrimientos para barreras térmicas (TBC, *thermal barrier coatings*) para los álabes de las turbinas, muchas aplicaciones requieren de materiales que minimicen la transferencia de calor. Existen otras aplicaciones donde el manejo térmico resultará de importancia capital. Por ejemplo, se espera que un chip de computadora que se fabrique en el año 2010 contenga mil millones de transistores y genere más potencia (con base en pulgadas cuadradas) que un reactor nuclear!

En esas aplicaciones se requieren materiales de elevada conductividad térmica. También la expansión térmica en los materiales desempeña un papel clave en muchas situaciones; esta expansión puede conducir al desarrollo de esfuerzos que lleven a la falla del material. Los científicos e ingenieros de materiales han creado muchos materiales novedosos con un coeficiente de expansión térmica cercano a cero o negativo. Se trata de una característica importante en materiales ópticos, como los utilizados en los espejos de los telescopios, cuyo enfoque cambia en función de la expansión y contracción térmica. Esta fotografía muestra la concepción de un artista del telescopio de rayos X Chandra. El sustrato de los espejos de los telescopios Chandra y Hubble de la NASA ha sido fabricado de un material de vidrio cerámico conocido como Zerodur™, manufacturado por Schott Glass Technologies. Obsérvense también los paneles solares. Zerodur™ es apenas uno de los muchos ejemplos de la forma en que la ciencia e ingeniería de los materiales ha causado un impacto sobre otras disciplinas científicas, creando conocimiento y beneficios para la sociedad. (Cortesía de la NASA.)

Propiedades térmicas de los materiales

¿Alguna vez se preguntó...

- ...cuál material tiene la conductividad térmica más alta?
- ...por qué, a pesar de que normalmente utilizamos materiales cerámicos como aislamiento, existen muchos materiales cerámicos que tienen una elevada conductividad térmica?
- ...si existen materiales que tengan coeficientes de expansión térmica de valor cero o negativo?
- ...qué material se utiliza para el sustrato del espejo del telescopio de rayos X Chandra?

En capítulos anteriores, describimos cómo las propiedades de un material pueden cambiar en función de la temperatura. En muchos casos, encontramos que las propiedades mecánicas y físicas de un material dependen de la temperatura a la cual funciona o a la que será sometido durante su procesamiento. Una apreciación de las propiedades térmicas es de utilidad para la comprensión de la falla mecánica de materiales

como los cerámicos, las barreras térmicas y las fibras, cuando cambia la temperatura; en procesos de diseño en los cuales los materiales deben ser calentados; o en la selección de materiales para la rápida transferencia del calor, como en los dispositivos electrónicos basados en semiconductores.

El manejo térmico se ha convertido en un factor muy importante en materiales de empa-

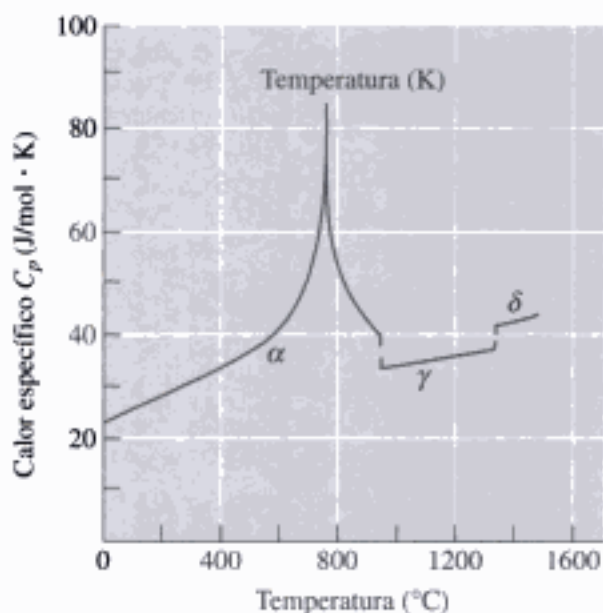


Figura 21-2

Efecto de la temperatura sobre el calor específico del hierro. Se muestran tanto el cambio en la estructura cristalina como el cambio de un comportamiento ferromagnético a un comportamiento paramagnético.

EJEMPLO 21-1 Calor específico del tungsteno

¿Cuánto calor debe aplicarse a 250 g de tungsteno para elevar su temperatura de 25° a 650 °C?

SOLUCIÓN

El calor específico del tungsteno es de $0.032 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{K}}$. Entonces:

$$\begin{aligned} \text{Calor requerido} &= (\text{calor específico}) (\text{masa}) (\Delta T) \\ &= (0.032 \text{ cal/g} \cdot \text{K}) (250 \text{ g}) (650 - 25) \\ &= 5000 \text{ cal} \end{aligned}$$

Si no hay pérdidas deberán suministrarse 5000 cal (es decir, 20 920 J) al tungsteno. Para calentar el metal se pueden utilizar una diversidad de procesos. Podemos utilizar un soplete de gas, podemos colocar el tungsteno en una bobina de inducción para inducir corrientes parásitas o de eddy, podemos hacer pasar una corriente eléctrica a través del metal o podemos colocar el metal en un horno calentado por resistores de SiC.

EJEMPLO 21-2 Calor específico del niobio

Suponga que 50 g de niobio tienen un incremento de temperatura de 75 °C cuando se calienta durante un cierto periodo. Estime el calor específico y determine el calor en términos de las calorías requeridas.

SOLUCIÓN

El peso atómico del niobio es de 92.91 g/mol. Podemos utilizar la ecuación 21-3 para estimar el calor requerido para elevar la temperatura de un gramo en 1°C:

$$C_p \approx \frac{6}{92.91} = 0.0646 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$$

Entonces el calor requerido total es:

$$\text{Calor} = \left(0.0646 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}} \right) (50 \text{ g}) (75 ^\circ\text{C}) = 242 \text{ cal}$$

21-2

Expansión térmica

Un átomo que aumenta en energía térmica y empieza a vibrar se comporta como si tuviera un radio atómico mayor. La distancia promedio entre los átomos y, por tanto, las dimensiones generales del material se incrementan. El cambio Δl en dimensiones del material por unidad de longitud está dado por el **coeficiente lineal de expansión térmica** α :

$$\alpha = \frac{l_f - l_0}{l_0 (T_f - T_0)} = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T} = \frac{\epsilon}{\Delta T} \quad (21-4)$$

donde T_0 y T_f son las temperaturas inicial y final y l_0 y l_f son las dimensiones inicial y final del material y ϵ es la deformación. También se puede definir un coeficiente *volumétrico* de expansión térmica (α_v), para describir el cambio en el volumen cuando cambia la temperatura del material. Si el material es isotrópico, $\alpha_v = 3\alpha$ se utiliza un instrumento conocido como dilatómetro para medir el coeficiente de expansión térmica. También es posible determinar la expansión térmica utilizando XRD. En la tabla 21-2 se dan los coeficientes de expansión térmica para varios materiales.

El coeficiente de expansión térmica de un material está relacionado con la resistencia de los enlaces atómicos. Para que los átomos se muevan saliéndose de sus posiciones de equilibrio, debe introducirse energía en el material. Si un pozo de energía muy profundo causado por enlaces atómicos muy fuertes es característico del material, los átomos se separarán en un grado menor y el material tendrá un coeficiente lineal de expansión bajo (capítulo 2). Esta relación también sugiere que los materiales que tengan una elevada temperatura de fusión, también debida a fuertes atracciones atómicas, tienen bajos coeficientes de expansión térmica (Fig. 21-3). En consecuencia, el plomo (Pb) tiene un coeficiente mucho mayor que el correspondiente a metales de elevado punto de fusión, como el tungsteno (W). La mayoría de los materiales cerámicos, que tienen fuertes enlaces iónicos o covalentes, tienen coeficientes bajos en comparación con los metales. Ciertos vidrios, como el sílice fundido, también tienen un bajo factor de empaquetamiento, lo que ayuda a absorber energía térmica con poco cambio dimensional. Aunque los enlaces dentro de las cadenas de polímeros son covalentes, los enlaces secundarios que unen las cadenas entre sí son débiles, lo que conduce a coeficientes altos. Los polímeros que tienen entrelazamientos cruzados fuertes, comúnmente tienen coeficientes más bajos que los polímeros lineales, como el polietileno, por ejemplo.

Se deben tomar algunas precauciones al calcular los cambios dimensionales en los materiales:

1. Las características de expansión de algunos materiales, en particular de cristales individuales y de materiales con una orientación preferida, son anisotrópicas.
2. Los materiales alotrópicos tienen cambios abruptos en sus dimensiones cuando se presenta la transformación de fase (Fig. 21-4). Estos cambios bruscos contribuyen al agrietamiento de los materiales refractarios cuando se calientan o se enfrían, y a las grietas de templeado en los aceros.
3. El coeficiente lineal de expansión cambia continuamente con la temperatura. Normalmente, α se encuentra en las listas de los manuales como una función complicada dependiente de la temperatura o como una constante para un solo rango particular de temperatura.

TABLA 21-2 ■ Coeficiente lineal de expansión térmica para materiales seleccionados a la temperatura ambiente

Material	Coeficiente lineal de expansión térmica ($\times 10^{-6} \text{ } 1/\text{ } ^\circ\text{C}$)
Al	25.0
Cu	16.6
Fe	12.0
Ni	13.0
Pb	29.0
Si	3.0
W	4.5
Acero 1020	12.0
Aleación de aluminio 3003	23.2
Fundición de hierro gris	12.0
Invar (Fe-36% Ni)	1.54
Acero inoxidable	17.3
Latón amarillo	18.9
Resina epóxica	55.0
Nylon 6,6	80.0
Nylon 6,6-33% fibra de vidrio	20.0
Polietileno	100.0
Polietileno-30% fibra de vidrio	48.0
Poliestireno	70.0
Al_2O_3	6.7
Sílice fundido	0.55
ZrO_2 parcialmente estabilizado	10.6
SiC	4.3
Si_3N_4	3.3
Vidrio de sosa y cal	9.0

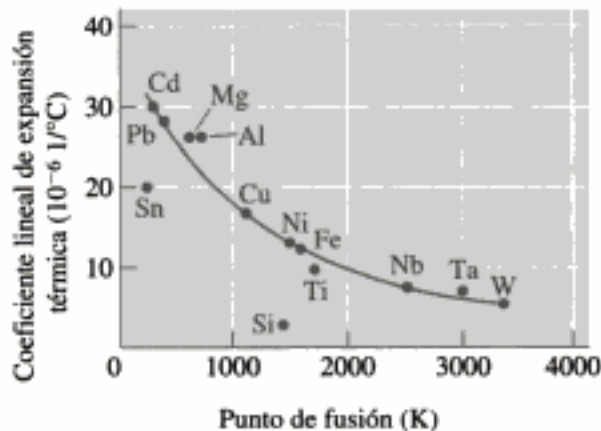


Figura 21-3
Relación entre el coeficiente lineal de expansión térmica y la temperatura de fusión en los metales a 25 °C. Los metales con punto de fusión más elevado tienden a expandirse menos.

4. La interacción del material con campos eléctricos o magnéticos producidos por dominios magnéticos puede impedir la expansión normal hasta que se alcanzan temperaturas superiores a la de Curie. Éste es el caso del Invar, una aleación de Fe-36% Ni, mismo que no sufre prácticamente ningún cambio dimensional a temperaturas inferiores a la de Curie (aproximadamente 200 °C). Esto hace que el Invar resulte atractivo como material para la fabricación de tiras bimetalicas (Fig. 21-4).

EJEMPLO 21-4 *Diseño de un molde para un proceso de colado*

Diseñe las dimensiones de un molde que será utilizado para producir una pieza vaciada de aluminio de forma rectangular de dimensiones, a 25 °C, de 25 × 25 × 3 cm.

SOLUCIÓN

Para producir un colado de dimensiones finales específicas, la cavidad del molde en el cual se va a vaciar el aluminio líquido debe ser de mayor tamaño. Una vez solidificado el líquido, lo cual ocurre a 660 °C en el caso del aluminio puro, el material vaciado sólido se contrae al enfriarse hasta la temperatura ambiente. Si calculamos la contracción esperada, podemos fabricar el molde original utilizado para producir esta cavidad con el tamaño más grande requerido.

El coeficiente lineal de expansión térmica para el aluminio es $25 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. El cambio en la temperatura desde la temperatura de solidificación hasta los 25 °C es $660 - 25 = 635 \text{ }^\circ\text{C}$. El cambio en cualquiera de las dimensiones está dado por:

$$\Delta l = l_0 - l_f = \alpha l_0 \Delta T$$

Para las dimensiones de 25 cm de lado, $l_f = 25 \text{ cm}$. Deseamos determinar l_0 :

$$l_0 - 25 = (25 \times 10^{-6}) (l_0) (635)$$

$$l_0 - 25 = 0.15875 l_0$$

$$0.984 l_0 = 25$$

$$l_0 = 25.40 \text{ cm}$$

Para la dimensión de 3 cm, $l_f = 3 \text{ cm}$.

$$l_0 - 3 = (25 \times 10^{-6}) (l_0) (635)$$

$$l_0 - 3 = 0.015875 l_0$$

$$0.984 l_0 = 3$$

$$l_0 = 3.05 \text{ cm}$$

Si diseñamos el molde con dimensiones $25.40 \times 25.40 \times 3.05 \text{ cm}$, la colada se contraerá a las dimensiones requeridas.

Cuando se calienta un material isotrópico lenta y uniformemente, éste se expande de manera uniforme sin crear ningún esfuerzo residual. Sin embargo, si al material se le limita el movimiento, los cambios dimensionales quizá no puedan realizarse y, en cambio se generan esfuerzos. Estos **esfuerzos térmicos** están relacionados con el coeficiente de expansión térmica, con el módulo de elasticidad E del material y con el cambio en la temperatura ΔT :

$$\sigma_{\text{térmica}} = \alpha E \Delta T \quad (21-5)$$

Los esfuerzos térmicos pueden presentarse a partir de una diversidad de fuentes. En estructuras grandes rígidas como los puentes, se pueden desarrollar restricciones como resultado de su diseño. Algunos puentes están diseñados en secciones y están conectadas con placas de acero, de forma que las secciones se muevan una en relación con la otra durante los cambios de temperatura estacionales.

Cuando se unen los materiales —por ejemplo, al recubrir las tinas de baño de hierro con un esmalte cerámico o al recubrir álabes de turbina de superaleación con una barrera térmica de zirconia estabilizada con itrio (YSZ)—, los cambios en temperatura causan cantidades diferentes

21-3 Conductividad térmica

La **conductividad térmica** K es una medida de la velocidad con la cual se transfiere el calor a través de un material. El tratamiento de la conductividad térmica es similar al de la difusión (capítulo 5). La conductividad térmica, similar al coeficiente de difusión, es una propiedad sensible a la microestructura. La conductividad se relaciona con el calor Q que se transfiere cada segundo a través de un plano dado del área A cuando existe un gradiente de temperatura $\Delta T/\Delta x$ (Fig. 21-5):

$$\frac{Q}{A} = K \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (21-6)$$

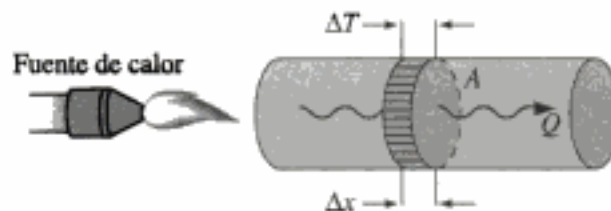


Figura 21-5

Cuando se calienta un extremo de la barra, fluye hacia el extremo frío de la misma un flujo térmico Q/A , a una velocidad determinada por el gradiente de temperatura producido en la barra.

TABLA 21-3 ■ Valores comunes de la conductividad térmica a la temperatura ambiente de materiales seleccionados

Material	Conductividad térmica ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Material	Conductividad térmica ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
Metales puros:		Materiales cerámicos:	
Ag	430	Al_2O_3	16–40
Al	238	Carbono (diamante)	2000
Cu	400	Carbono (grafito)	335
Fe	79	Arcilla refractaria	0.26
Mg	100	Carburo de silicio	hasta 270
Ni	90	AlN	hasta 270
Pb	35	Si_3N_4	hasta 150
Si	150	Vidrio de cal y sosa	0.96–1.7
Ti	22	Sílice vítreo	1.4
W	171	Vidrio Vycor™	12.5
Zn	117	ZrO_2	4.2
Zr	23	Polímeros:	
Aleaciones:		Nylon-6,6	0.25
Acero 1020	100	Polietileno	0.33
Aleación aluminio 3003	280	Poliimida	0.21
Acero inoxidable 304	30	Poliestireno	0.13
Cementita	50	Espuma de poliestireno	0.029
Cu-30% Ni	50	Teflón	0.25
Ferrita	75		
Fundición de hierro gris	79.5		
Latón amarillo	221		

Nota: $1 \text{ cal/cm} \cdot \text{s} \cdot K = 418.4 \text{ W} \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

El vidrio debería ser excepcionalmente grueso para impedir el flujo térmico máximo deseado. Podemos hacer varias cosas a fin de reducir el flujo térmico. Aunque todos los vidrios de silicatos tienen conductividades térmicas similares, podemos utilizar, en lugar de ellos, un material polimérico transparente (como el polimetilmetacrilato, por ejemplo). Los polímeros tienen conductividades térmicas de aproximadamente un orden de magnitud menor que el de los materiales cerámicos vítreos. También podemos utilizar vidrio doble, con los vidrios separados ya sea mediante un gas (aire o Ar que tienen una conductividad térmica muy baja) o una lámina de polímero transparente.

21-4

Choque térmico

Los esfuerzos que causan la fractura de los materiales frágiles pueden introducirse tanto térmica como mecánicamente. Cuando se enfría rápidamente una pieza de material, se produce un gradiente de temperatura. Este gradiente puede causar diferentes cantidades de contracción en áreas distintas. Si los esfuerzos residuales tensiles son lo suficientemente elevados, los defectos pueden propagarse y causar la falla. Un comportamiento similar se puede presentar si se calienta rápidamente un material. Esta falla de material causada por esfuerzos inducidos por cambios súbitos en la temperatura se conoce como **choque térmico**. El comportamiento de choque térmico se ve afectado por varios factores:

1. *Coefficiente de expansión térmica*: un coeficiente bajo minimiza los cambios dimensionales y reduce la capacidad de resistir el choque térmico.
2. *Conductividad térmica*: la magnitud del gradiente de temperatura queda determinada en parte por la conductividad térmica del material. Una conductividad térmica elevada ayuda a la transferencia del calor y reduce con rapidez las diferencias de temperatura en el material.
3. *Módulo de elasticidad*: un módulo de elasticidad bajo permite la absorción de grandes cantidades de deformación antes de que los esfuerzos alcancen el nivel crítico requerido para causar la fractura.
4. *Esfuerzo a la fractura*: un esfuerzo elevado requerido para la fractura permite la absorción de deformaciones mayores. El esfuerzo a la fractura para un material específico será elevado si los defectos son pequeños y poco numerosos.
5. *Transformaciones de fase*: pueden presentarse cambios dimensionales adicionales debido a las transformaciones de fase. La transformación del sílice de cuarzo a cristobalita, por ejemplo, introduce esfuerzos residuales e incrementa problemas relacionados con el choque térmico. De manera similar, no podemos utilizar el material cerámico PbTiO_3 puro, ya que los esfuerzos introducidos durante la transformación de cúbica a tetragonal causará que el material cerámico se fracture.

Un método para medir la resistencia al choque térmico consiste en determinar la máxima diferencia de temperatura que se puede tolerar durante un templado sin afectar las propiedades mecánicas de un material. El vidrio de sílice puro (fundido) tiene una resistencia al choque térmico de aproximadamente 3000 °C. La figura 21-7 muestra el efecto de la diferencia de la temperatura de templado sobre el módulo de ruptura del sialón ($\text{Si}_3\text{Al}_2\text{O}_5\text{N}_2$) después del templado; es evidente la ausencia de grietas y, por tanto, de cambios en las propiedades del material cerámico hasta que la diferencia de temperatura de templado se acerca a 950 °C. Otros materiales cerámicos tienen resistencias inferiores. La resistencia al choque para la zirconia parcialmente estabilizada (PSZ) y el Si_3N_4 es de aproximadamente 500 °C; para el SiC de 350 °C; y para el Al_2O_3 y el vidrio ordinario, aproximadamente de 200 °C.

Otra forma de evaluar la resistencia de un material al choque térmico es mediante el parámetro de choque térmico (R' o R).

$$R' = \text{Parámetro de choque térmico} = \frac{\sigma_f K (1 - \nu)}{E \cdot \alpha} \quad (21-8a)$$

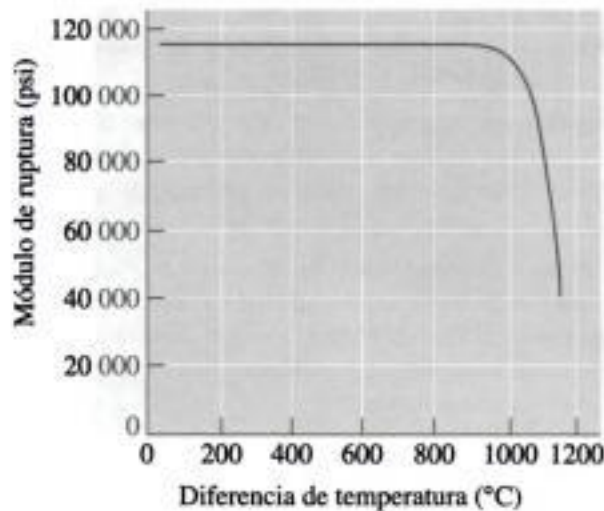


Figura 21-7

Efecto de la diferencia de la temperatura de templado sobre el módulo de ruptura del sílice. La resistencia al choque térmico del material cerámico es buena hasta aproximadamente 950 °C.

o

$$R = \frac{\sigma_f \cdot (1 - \nu)}{E \cdot \alpha} \quad (21-8b)$$

donde σ_f es el esfuerzo a la fractura del material, ν es la relación de Poisson, E es el módulo de elasticidad y α es el coeficiente lineal de expansión térmica. La ecuación 21-8b se utiliza en situaciones donde la velocidad de transferencia térmica es esencialmente infinita. Un valor más elevado de parámetro de choque térmico significa una mejor resistencia al choque térmico. El parámetro de choque térmico representa el máximo cambio en temperatura que se puede presentar sin fracturar al material.

Por lo general, el choque térmico no es un problema en la mayoría de los metales, ya que éstos normalmente tienen suficiente ductilidad para permitir la deformación y no la fractura. Como se dijo antes, muchas composiciones de materiales cerámicos, desarrollados como materiales cerámicos de cero expansión térmica (basados en fosfatos de sodio-zirconio), así como muchos materiales cerámicos vítreos tienen excelente resistencia al choque térmico.[8,9]

RESUMEN

- Las propiedades térmicas de los materiales pueden explicarse por lo menos parcialmente por el movimiento de los electrones y de los fonones.
- La capacidad de calor y el calor específico representan la cantidad de energía requerida para elevar un grado la temperatura de una cierta cantidad de material; la temperatura, la estructura cristalina y los enlaces influyen sobre ellos.
- El coeficiente de expansión térmica describe los cambios dimensionales que ocurren en un material cuando cambia su temperatura. Los enlaces fuertes hacen que los coeficientes de expansión sean bajos. Los metales de alto punto de fusión y los materiales cerámicos tienen coeficientes bajos, en tanto que los metales de bajo punto de fusión y los polímeros tienen coeficientes altos.
- La expansión térmica de muchos materiales de ingeniería puede acercarse a cero al controlar adecuadamente la combinación de fases diferentes que muestren coeficientes de expansión térmica positivos y negativos. La cerámica vítrea Zerodur™ y el material cerámico NZP son ejemplos de este tipo de materiales.
- Debido a la expansión térmica, se generan esfuerzos en un material al cambiar la temperatura. Se requiere de cuidado en el diseño, el procesamiento o la selección de los materiales para evitar la falla debida a esfuerzos térmicos.

- Tanto los fonones como los electrones transfieren el calor en los materiales. La conductividad térmica depende de las contribuciones relativas de cada uno de estos mecanismos, así como de la estructura atómica y de la temperatura.
- Los fonones desempeñan un papel importante en las propiedades térmicas de los materiales cerámicos, de los semiconductores y de los polímeros. Las estructuras desorganizadas, como las de los vidrios cerámicos o los polímeros amorfos, dispersan los fonones y causan baja conductividad.
- La conductividad térmica es sensible a la microestructura. Los materiales cerámicos de uso más común tienen una baja conductividad térmica debido a porosidad y a defectos. El AlN, SiC, Si₃N₄ de alta conductividad térmica se han desarrollado mediante un procesamiento adecuado utilizando aditivos de sinterización y la formación de segundas fases deseables, así como el control de la textura.
- Los materiales cerámicos cristalinos y los polímeros cristalinos tienen conductividades más elevadas que sus contrapartes vítreas o amorfas. Las segundas fases, incluyendo la porosidad, tienen un efecto significativo en la conductividad térmica de los materiales no metálicos.
- Las contribuciones electrónicas son de gran importancia en los metales; en consecuencia, las imperfecciones de red que dispersan electrones reducen la conductividad. El efecto de la temperatura es menos fácil de definir, ya que al aumentar la temperatura se incrementa la energía de los fonones, pero también aumenta la dispersión tanto de fonones como de electrones.

GLOSARIO

- Calor específico** Energía requerida para elevar la temperatura de un gramo de material en un grado.
- Capacidad de calor** Energía requerida para elevar la temperatura de un mol de un material en un grado.
- Choque térmico** Falla de un material causada por esfuerzos introducidos debidos a cambios súbitos en la temperatura.
- Coefficiente lineal de expansión térmica** Describe la cantidad en que cambia cada unidad de longitud de un material al cambiar la temperatura un grado.
- Conductividad térmica** Propiedad sensible a la microestructura que mide la velocidad con que se transfiere el calor a través de un material.
- Constante de Lorentz** Constante que relaciona la conductividad eléctrica con la térmica.
- Esfuerzos térmicos** Esfuerzos introducidos en un material a causa de diferencias en la cantidad de expansión o de contracción que se presentan debido a un cambio en la temperatura.
- Fonón** Paquete de ondas elásticas. Se define por su energía, su longitud de onda, o frecuencia, con la que se transfiere energía a través de un material.

INFORMACIÓN ADICIONAL

1. JOHNSON, G. "At Los Alamos, Two Visions of Supercomputing", *The New York Times*, 2002, pp. 1, 4.
2. GREENBERG, C. B. "Thin Films on Float Glass: The Extraordinary Possibilities", *J. of Indu. Chem.*, 40(1), 2001, pp. 26-32.
3. GREENBERG, C. *Se agradecen los análisis sobre lentes con autolimpieza y sobre el uso de recubrimientos con películas delgadas*, 2002.

4. LIMAYE, S.Y., D.K. AGRAWAL y H.A. MCKINSTRY. "Synthesis and Thermal Expansion of $MZr_4(PO_4)_6$, ($M = Mg, Ca, Sr, Ba$)", *Journal of the American Ceramic Society* 70, 1987, pp. C232-36.
5. ROY, R. *et al.* "A New Structural Family of Near Zero Expansion Ceramics", *Materials Research Bulletin* 19, 1984, pp. 471-477.
6. ROY, R., The American Ceramic Society. "Low Thermal Expansion Ceramics: A Retrospective", en *Low-Expansion Materials*, American Ceramic Society, 1995.
7. WATARI, K. y S. L. SHINDE. "High Thermal Conductivity Materials", *MRS Bulletin*, junio de 2001, pp. 440-442.
8. LIMAYE, S. *Comunicación personal.*
9. BEALL, G.H. "Glass-Ceramics", en *Advances in Ceramics vol. 18, Commercial Glasses*, D.C. BOYD y J.F. MACDOWELL Eds., American Ceramic Society, 1986, pp. 157-173.

✓ PROBLEMAS

Sección 21-1 Capacidad de calor y calor específico

- 21-1 Mencione dos aplicaciones cualesquiera donde resulta deseable una elevada conductividad térmica.
- 21-2 Mencione dos aplicaciones cualesquiera donde resulta deseable una reducida conductividad térmica.
- 21-3 Calcule el calor (en calorías y en joules) requerido para elevar 50°C la temperatura de un 1 kg de los siguientes materiales:
a) plomo b) níquel c) Si_3N_4 d) Nylon 6,6
- 21-4 Calcule la temperatura de una muestra de 100 g de los siguientes materiales (originalmente a 25°C) cuando se les introducen 3000 calorías:
a) tungsteno b) titanio
c) Al_2O_3 d) polietileno de baja densidad
- 21-5 Un aislante de alúmina para un dispositivo eléctrico también debe servir como sumidero de calor. Se ha observado durante su uso una elevación de temperatura de 10°C en un aislante de alúmina de $1 \times 1 \times 0.02$ cm. Determine el espesor de un aislador de polietileno de alta densidad que se necesitaría para tener el mismo desempeño como sumidero de calor. La densidad de la alúmina es de 3.96 g/cm^3 .
- 21-6 Una muestra de 200 g de aluminio se calienta a 400°C y después se templea en 2000 cm^3 de agua a 20°C . Calcule la temperatura del agua después de que tanto el aluminio como el agua alcanzan el equilibrio. Suponga que no hay pérdidas de calor en el sistema.

Sección 21-2 Expansión térmica

- 21-7 Se produce una hoja de vidrio de cal y sosa de 2 metros de largo a 1400°C . Determine su longitud después de que se haya enfriado hasta 25°C .
- 21-8 Una fundición de cobre debe hacerse con dimensiones finales de $1 \times 12 \times 24$ pulg. Determine el tamaño del modelo que debe utilizarse para fabricar el molde en el cual se va a vaciar el cobre líquido durante el proceso de manufactura.
- 21-9 Se produce una pieza vaciada de aluminio utilizando el proceso de molde permanente. En este proceso, se vacía el aluminio líquido en un molde de fundición de hierro gris calentado a 350°C . Deseamos producir una fundición de aluminio que a 25°C tenga 15 pulg de largo. Calcule la longitud de la cavidad que se debe maquinar en el molde de fundición de hierro gris.
- 21-10 Recubrimos un alambre de cobre de 2 mm de diámetro y 100 cm de largo con un recubrimiento aislante de resina epóxica de 0.5 mm de espesor. Determine la longitud del cobre y del recubrimiento cuando se incrementa su temperatura de 25 a 250°C . ¿Qué es lo que probablemente le ocurrirá al recubrimiento de resina epóxica como resultado de este calentamiento?
- 21-11 Producimos un material compuesto bimetalico de 10 pulgadas de largo formado por una tira de latón amarillo unido a una tira de Invar. Determine la longitud a la cual cada uno de estos materiales se expandirá cuando se incrementa la temperatura de 20 a 150°C . Dibuje un esquema que muestre lo que ocurrirá a la forma de la tira bimetalica.

- 21-12 Dé ejemplos de materiales que tengan coeficientes de expansión térmica negativos o cercanos a cero.
- 21-13 ¿Qué es Zerodur™? ¿Cuáles son algunas de las propiedades y aplicaciones de este material?

Sección 21-3 Conductividad térmica

Sección 21-4 Choque térmico

- 21-14 Defina los términos conductividad térmica y choque térmico de los materiales.
- 21-15 En la mayoría de los materiales cerámicos la conductividad térmica es baja. ¿Verdadero o falso? Explique.
- 21-16 ¿Es la conductividad térmica de los materiales una propiedad sensible a la microestructura? Explique.
- 21-17 Un componente para motor de níquel se recubre con SiC para proporcionar resistencia a la corrosión a altas temperaturas. Si a 20 °C no hay esfuerzos residuales presentes, determine los esfuerzos térmicos que se desarrollan al calentarse la pieza hasta 1000 °C durante su uso. (Véase la tabla 14-3.)
- 21-18 A una matriz de aluminio se le incorporan fibras de alúmina de 2 cm de largo. Suponiendo una buena unión entre las fibras cerámicas y el aluminio, estime los esfuerzos térmicos que actúan sobre las fibras cuando la temperatura del material compuesto se incrementa a 250 °C. ¿Los esfuerzos en la fibra son de tensión o de compresión? (Véase la tabla 14-3.)
- 21-19 Una barra de cobre de 24 pulg de largo y con una resistencia a la cedencia de 30 000 psi se calienta a 120 °C y de inmediato se le sujeta firmemente a una estructura rígida. ¿Se deformará el cobre plásticamente durante su enfriamiento hasta 25 °C? ¿Cuánto se deformará la barra si se le retira de la estructura después de enfriarse?
- 21-20 Repita el problema 21-19, pero utilizando una varilla de carburo de silicio en lugar de la varilla de cobre. (Véase la tabla 14-3.)
- 21-21 Una placa de carburo de silicio de 3 cm separa el aluminio líquido (conservado a 700 °C) de una carcasa de acero enfriada por agua y mantenida a 20 °C. Calcule el calor Q transferido al acero por cm^2 de carburo de silicio cada segundo.
- 21-22 Una hoja de polietileno de 0.01 pulg de espesor se coloca entre dos hojas de 3×3 pies $\times$ 0.125 pulg de vidrio de cal y sosa para producir una ventana. Calcule a) el calor perdido por día a través de la ventana cuando la temperatura en la habitación es de 25 °C y el aire exterior está a 0 °C y b) el calor que se introduce a través de la ventana todos los días cuando la temperatura de la habitación es de 25 °C y el aire exterior está a 40 °C.

- 21-23 Desearíamos fabricar una placa deflectora de calor que permita la transferencia rápida del calor paralelamente a la hoja, pero muy lentamente en la dirección perpendicular. En consecuencia, incorporamos un kilo de alambres de cobre, cada uno de ellos de 0.1 cm de diámetro, en 5 kg de una matriz de polímero poliimida. Estime la conductividad térmica en la dirección paralela y en la dirección perpendicular a la hoja.
- 21-24 Suponga que sumergimos una varilla de aluminio de 1 cm de diámetro y 10 de largo en un litro de agua a 20 °C. El otro extremo de la varilla está en contacto con una fuente de calor que opera a 400 °C. Determine el tiempo necesario para calentar el agua a 25 °C si se pierde el 75% del calor por radiación proveniente de la barra.
- 21-25 Escriba las ecuaciones que definen el parámetro de la resistencia al choque térmico (TSR, de Thermal Shock Resistance). Con base en lo anterior, exprese su opinión respecto a materiales que muestran un coeficiente de expansión térmica cercano a cero.
- 21-26 Determine el parámetro de choque térmico para el nitruro de silicio, el carburo de silicio prensado en caliente y la alúmina y compare con la resistencia al choque térmico según queda definido por la diferencia máxima de temperatura de temple. (Véase la tabla 14-3.)
- 21-27 El hierro fundido gris tiene una conductividad térmica mayor que el hierro fundido dúctil o maleable. Revise el capítulo 12 y explique por qué es de esperar esta diferencia en la conductividad.



Problemas de diseño

- 21-28 Un recipiente para reacciones químicas contiene líquidos a una temperatura de 680 °C. La pared del recipiente debe fabricarse de forma que la pared exterior opere a una temperatura de 35 °C o menos. Diseñe la pared del recipiente y los materiales apropiados, si $Q_{\text{máxima}} = 6000 \text{ cal/s}$.
- 21-29 Un recipiente de nitruro de silicio contiene cobre líquido. El diámetro interior del recipiente es de 3 pulg. El exterior del recipiente está en contacto con cobre que contiene canales de enfriamiento a través de los cuales fluye agua a 20 °C con una velocidad de 50 litros por minuto. El cobre debe mantenerse a una temperatura por debajo de 25 °C. Diseñe un sistema que logre estos objetivos.
- 21-30 Diseñe un panel de metal recubierto con esmalte vítreo capaz de un ciclado térmico entre 20 y 150 °C. Se espera que los vidrios generalmente disponibles tengan una resistencia a la tensión de 5000 psi y una resistencia a la compresión de 50 000 psi.

CAPÍTULO 22 *Corrosión y desgaste*



PARTE 5

Protección contra el deterioro y la falla de los materiales

En esta parte, se analizará la falla de los materiales debida a la corrosión y el desgaste. La falla causada por la fatiga y la termofluencia se estudió en el capítulo 6. Encontramos nuevamente que el deterioro o la falla se relaciona con la estructura, propiedades y el procesamiento de los materiales. En el capítulo 22 se

estudiará la corrosión y el desgaste; es de particular importancia la corrosión electroquímica. Además de examinar el mecanismo de la corrosión, veremos técnicas para controlar y evitar daños a los materiales debido a esos procesos.

Corrosión y desgaste

¿Alguna vez se preguntó...

- ...por qué se oxida el hierro?
- ...qué significan las siglas "WD-40™"?
- ...si tiene alguna utilidad, en algún momento, el proceso de corrosión?
- ...por qué los depósitos de los calentadores de agua domésticos contienen varillas de Mg?
- ...si los metales como el aluminio y el titanio sufren corrosión?
- ...en qué forma el desgaste afecta a la vida útil de diferentes componentes tales como los cigüeñales?
- ...qué proceso utiliza la erosión mecánica y química en la manufactura de los chips o microprocesadores semiconductores?

La composición y la integridad física de un material sólido se alteran en un ambiente corrosivo. Si se trata de la corrosión química, un líquido corrosivo disuelve el material. En la corrosión electroquímica, se retiran átomos del metal del material sólido como resultado de un circuito eléctrico producido. Los metales y ciertos materiales cerámicos reaccionan en un ambiente gaseoso, por lo general a temperaturas elevadas, y

el material puede destruirse debido a la formación de óxidos y otros compuestos. Los polímeros se degradan al ser expuestos al oxígeno a temperaturas elevadas. Los materiales pueden alterarse si se les expone a la radiación o incluso a las bacterias. Finalmente, una diversidad de mecanismos de desgaste y de desgaste-corrosión modifican la forma de los materiales. De acuerdo con un estudio concluido en el año 2001, en

Estados Unidos el combate a la corrosión cuesta aproximadamente 6% del producto nacional bruto (GDP, de *gross domestic product*). Esta cantidad, que incluye costos directos e indirectos, alcanzó la cifra de aproximadamente 550 000 millones de dólares en 1998.[1]

El proceso de corrosión se presenta con la finalidad de reducir el nivel de energía libre de un sistema; ocurre a lo largo de un periodo, ya sea a altas o a bajas temperaturas. El secreto para impedir la corrosión consiste en colocar un recubrimiento que evite el contacto con el reactante o aplicar una fuerza impulsora en oposición para reducir la velocidad del proceso. La corrosión química es de especial consideración en muchos sectores incluyendo el transporte (puentes, oleoductos, automóviles, aviones, trenes y barcos), servicios públicos (energía eléctrica, agua, telecomunicaciones y plantas de energía nuclear), así como la producción y manufactura (industria alimenticia, microelectrónica y refinerías de petróleo).

La corrosión no sólo debe ser vigilada, sino que también debe ser tomada en consideración en el diseño de cada uno de los diferentes componentes. En una planta de energía nuclear, ocurrió recientemente un incidente en el cual una corrosión significativa produjo una perforación (de aproximadamente 6 pulg de profundidad, 5 pulg de largo y 7 pulg de ancho) en un depósito de almacenamiento temporal donde la corrosión se presentaba a una velocidad aproximada de 2 pulg por año. La corrosión era causada por

una fuga de ácido bórico que se utilizaba como baño refrigerante para las varillas de uranio. De no haberse detectado y si no hubiera sido por el diseño de la placa de acero inoxidable que resistió bajo condiciones corrosivas y altas presiones, podría haber ocurrido un accidente nuclear mayor.[2]

El proceso de corrosión, que consiste en el deterioro de un material metálico debido a una reacción con productos químicos presentes en el entorno, puede también ser de utilidad. Por ejemplo, en el pulido de alta tecnología de las obleas semiconductoras, un proceso conocido como pulido químico mecánico (CMP, de *chemical mechanical polishing*) utiliza la corrosión y la erosión. De manera similar, el purificado de ciertos metales, como el cobre, utiliza un proceso electroquímico de disolución, que es similar a la corrosión acuosa. Entonces, los procesos subyacentes que causan la corrosión y la erosión no siempre son perjudiciales. En la naturaleza, la corrosión y la erosión tienen un papel importante en la formación de cañadas y cavernas.

El objetivo de este capítulo es presentar los principios y mecanismos mediante los cuales se presentan la corrosión y el desgaste bajo diferentes condiciones. Esto incluye la corrosión acuosa de los metales, la oxidación de los mismos, la corrosión de los materiales cerámicos y la degradación de los polímeros. Proporcionaremos un resumen de las diferentes tecnologías utilizadas para evitar o minimizar la corrosión y sus problemas asociados.[3-5]

22-1 Corrosión química

En la **corrosión química**, es decir, en la disolución directa, un material se disuelve en un medio corrosivo líquido. El material seguirá disolviéndose hasta que se consuma totalmente o hasta que se sature el líquido. Las aleaciones base cobre, por ejemplo, desarrollan una pátina verde a causa de la formación de carbonato e hidróxidos de cobre. Ésta es la razón por la cual, por ejemplo, la Estatua de la Libertad se ve verde. La corrosión química del cobre, del tantalio, del silicio, del bióxido de silicio y de otros materiales se puede lograr mediante condiciones extremadamente bien controladas. En el proceso de las obleas de silicio, por ejemplo, un proceso conocido como pulido químico mecánico utiliza lodos de sílice para la erosión mecánica. Este proceso crea superficies extremadamente planas que son adecuadas para el proceso de las obleas de silicio. También en la naturaleza se presenta la corrosión química. Por ejemplo, la corrosión

química de las rocas mediante el ácido carbónico (H_2CO_3) y la erosión mecánica del viento y del agua desempeñan un papel importante en la formación de cañadas y cavernas.

Ataque por metal líquido Los metales líquidos atacan primero un sólido en lugares de alta energía, como son los límites de grano. Si estas regiones continúan siendo atacadas de manera preferencial, finalmente se presentarán grietas (Fig. 22-1). Con frecuencia, esta forma de corrosión se complica por la presencia de fundentes que aceleran el ataque o mediante corrosión electroquímica. Algunos metales agresivos, como el litio líquido, también pueden atacar los materiales cerámicos.



Figura 22-1

El plomo se conserva en cubas de acero grueso durante su refinado. En este caso, el plomo fundido ha atacado una soldadura en una placa de acero y se han desarrollado grietas. Eventualmente, las grietas se propagaron a través del acero y la cuba tuvo una fuga de plomo fundido.

Lixiviación selectiva Un elemento particular de una aleación se puede someter a un proceso de lixiviación selectiva para separarlo del sólido. En un latón que contenga más de 15% de Zn se puede presentar el **dezincificado**. A altas temperaturas, tanto el cobre como el zinc se disuelven mediante soluciones acuosas; los iones de zinc se quedan en la solución, en tanto que los iones de cobre se vuelven a depositar en el latón (Fig. 22-2). Finalmente, el latón se hace poroso y débil.

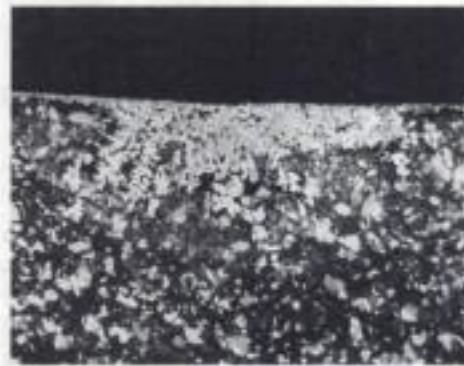


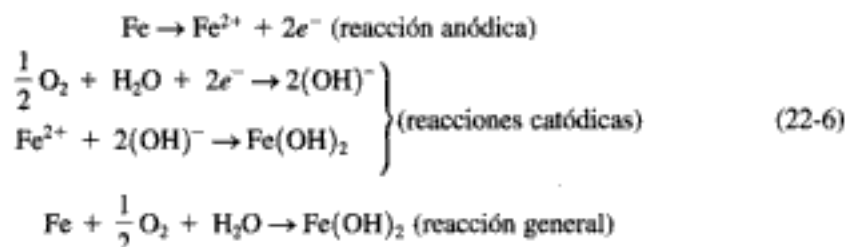
Figura 22-2

Microfotografía de un depósito de cobre en latón, mostrando el efecto del dezincificado (50 x).

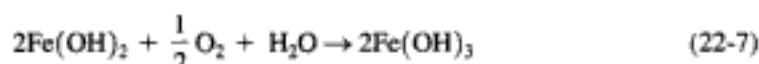
La **corrosión grafitica** del hierro fundido gris ocurre cuando el hierro se disuelve selectivamente en agua o en la tierra, desprendiéndose hojuelas de grafito y un producto de la corrosión. La corrosión grafitica localizada causa con frecuencia fugas o la falla de las tuberías de gas de hierro gris, lo que puede causar explosiones.

Disolución y oxidación de los materiales cerámicos Los materiales cerámicos refractarios que se utilizan para contener el metal fundido durante la fusión y el refinado pueden ser disueltos por las escorias producidas sobre la superficie del metal. Por ejemplo, un refractario ácido (de alto SiO_2) se verá rápidamente atacado por una escoria básica (de alto CaO o MgO).

El electrodo de oxígeno enriquece el electrolito con iones $(OH)^-$. Estos iones reaccionan con los iones metálicos de carga positiva y generan un producto sólido. En el caso de la herrumbre del hierro:



La reacción continúa mientras el $Fe(OH)_2$ sigue reaccionando con más oxígeno y agua:



El $Fe(OH)_3$ se conoce comúnmente como *herrumbre*.

3. *El electrodo de agua:* En la oxidación de los ácidos, la reacción catódica produce agua como subproducto:



Si está disponible un suministro continuo tanto de oxígeno como de hidrógeno, el electrodo de agua no produce ni herrumbre sólida ni una concentración elevada o dilución de iones en el cátodo.

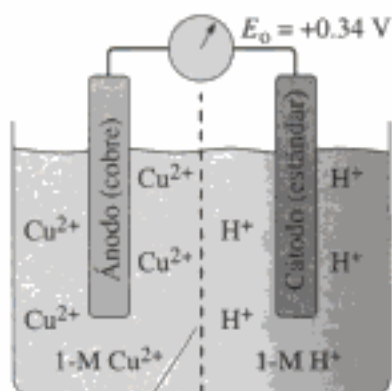
22-3

Potencial del electrodo en las celdas electroquímicas

En la electrodeposición, se requiere de un voltaje impuesto para hacer que fluya una corriente en la celda; pero en la corrosión se desarrolla naturalmente una diferencia de potencial al colocar un material en una solución. Veamos cómo se desarrolla el potencial requerido para que se presente la reacción de corrosión.

Potencial del electrodo Cuando en un electrolito se coloca un metal puro, se desarrolla un **potencial en el electrodo** que está relacionado con la tendencia de material a ceder sus electrones. Sin embargo, la fuerza impulsora para la reacción de oxidación se compensa por una fuerza impulsora igual pero opuesta para la reacción de reducción. No ocurre una corrosión neta. En consecuencia, no podemos medir el potencial del electrodo para un material de un solo electrodo.

Serie de fuerzas electromotrices Para determinar la tendencia de un metal a ceder sus electrones, medimos la diferencia de potencial entre el metal y un electrodo estándar utilizando una semicelda (Fig. 22-5). El electrodo de metal a probar se coloca en una solución de 1 mol (M) de sus iones. También se coloca un electrodo estándar de referencia en una solución 1-M de sus iones. La palabra "estándar" se utiliza en un sentido termodinámico. Los dos electrolitos están en contacto eléctrico, pero sin permitir que se mezcle uno con el otro. Cada electrodo establece su propio potencial de electrodo. Al medir el voltaje existente entre los dos electrodos cuando el circuito está abierto, obtenemos la diferencia de potencial. Al potencial del electrodo de hidrógeno, que se toma como nuestro electrodo estándar de referencia, se le da arbitrariamente el valor de cero volts. Si el metal tiene una tendencia a ceder electrones mayor que el hidrógeno, entonces el potencial del metal es negativo, es decir, el metal es anódico con respecto al electrodo de hidrógeno.



Pantalla que permite la transferencia de cargas, pero no la mezcla de los electrolitos.

Figura 22-5

Semicelda utilizada para medir el potencial del electrodo del cobre bajo situaciones estándar. El potencial del electrodo del cobre es la diferencia de potencial entre éste y el electrodo estándar de hidrógeno en un circuito abierto. Puesto que E_0 es superior a cero, el cobre es catódico en comparación con el electrodo de hidrógeno.

La serie de fuerzas electromotrices o fem que aparece en la tabla 22-1 compara el potencial estándar de electrodo E_0 para cada uno de los metales con el del electrodo de hidrógeno bajo condiciones estándar de 25 °C y solución 1-M de iones en el electrolito. Obsérvese que la medición del potencial se efectúa cuando el circuito eléctrico está abierto. La diferencia de voltaje empieza a cambiar en cuanto se cierra el circuito.

Cuanto más negativo sea el valor del potencial para la oxidación del metal, éste será más electropositivo; esto significa que el metal tendrá una tendencia más elevada a sufrir la reacción de oxidación. Por ejemplo, los álcalis y los metales de tierras alcalinas (por ejemplo, Li, K, Ba, Sr y Mg) son tan reactivos que se deben conservar de manera que se impida cualquier contacto con el oxígeno. Por otra parte, los metales que están hacia la parte inferior de

TABLA 22-1 ■ Serie de fuerzas electromotrices (fem) para elementos y reacciones seleccionados

	Metal	Potencial del electrodo E_0 (volts)
Anódicos	↑	
	$\text{Li} \rightarrow \text{Li}^+ + e^-$	-3.05
	$\text{Mg} \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2e^-$	-2.37
	$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3e^-$	-1.66
	$\text{Ti} \rightarrow \text{Ti}^{2+} + 2e^-$	-1.63
	$\text{Mn} \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 2e^-$	-1.63
	$\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2e^-$	-0.76
	$\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}^{3+} + 3e^-$	-0.74
	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2e^-$	-0.44
	$\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{2+} + 2e^-$	-0.25
	$\text{Sn} \rightarrow \text{Sn}^{2+} + 2e^-$	-0.14
	$\text{Pb} \rightarrow \text{Pb}^{2+} + 2e^-$	-0.13
	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2e^-$	0.00
	$\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2e^-$	+0.34
	$4(\text{OH})^- \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^-$	+0.40
	$\text{Ag} \rightarrow \text{Ag}^+ + e^-$	+0.80
	$\text{Pt} \rightarrow \text{Pt}^{4+} + 4e^-$	+1.20
	$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e^-$	+1.23
Catódicos	↓	
	$\text{Au} \rightarrow \text{Au}^{3+} + 3e^-$	+1.50

donde w es el peso depositado o corroído (g), I es la corriente (A), M es la masa atómica del metal, n es la valencia del ion metal, t es el tiempo (s) y F es la constante de Faraday (96 500 C). Esta ley dice básicamente que un equivalente de un gramo de un metal se depositará utilizando 96 500 C de carga. A menudo se expresa la corriente en función de la densidad de corriente, $i = I/A$, por lo que la ecuación 22-10 se convierte en

$$w = \frac{iAtM}{nF}, \quad (22-11)$$

donde el área A (cm²) es la superficie del ánodo o del cátodo.

Los siguientes ejemplos ilustran el uso de la ecuación de Faraday para calcular la densidad de la corriente.

EJEMPLO 22-2 *Diseño de un proceso de deposición de cobre*

Diseñe un proceso para electrodepositar una capa de 0.1 cm de espesor de cobre en una superficie de cátodo de 1×1 cm.

SOLUCIÓN

Para producir una capa de 0.1 cm de espesor en una superficie de área igual a 1 cm², el peso del cobre debe ser:

$$\rho_{\text{Cu}} = 8.96 \text{ g/cm}^3 \quad A = 1 \text{ cm}^2$$

$$\text{Volumen de cobre} = (1 \text{ cm}^2)(0.1 \text{ cm}) = 0.1 \text{ cm}^3$$

$$\text{Peso del cobre} = (8.96 \text{ g/cm}^3)(0.1 \text{ cm}^3) = 0.896 \text{ g}$$

De la ecuación de Faraday, donde $M_{\text{Cu}} = 63.54$ g/mol y $n = 2$:

$$It = \frac{wnF}{M} = \frac{(0.896)(2)(96\,500)}{63.54} = 2722 \text{ A} \cdot \text{s}$$

Por tanto, es posible utilizar varias combinaciones diferentes de corriente y tiempo para producir el depósito de cobre:

Corriente	Tiempo
0.1 A	27 220 s = 7.6 h
1.0 A	2 722 s = 45.4 min
10.0 A	272.2 s = 4.5 min
100.0 A	27.22 s = 0.45 min

Nuestra decisión respecto a la combinación exacta de tiempo y corriente puede basarse en la tasa de producción y en la calidad del depósito de cobre. Las corrientes bajas requieren tiempos muy largos de deposición, lo que quizá puede hacer que el proceso resulte económicamente inadecuado. Sin embargo, las corrientes altas pueden reducir la eficiencia de la deposición. La eficiencia de la deposición puede depender de la composición del electrolito que contiene los iones de cobre, así como de cualesquiera impurezas o aditivos presentes. Las corrientes de 10 A o de 100 A son demasiado elevadas; pueden iniciar otras reacciones colaterales no deseadas. El depósito puede también resultar no uniforme y áspero. Es posible que se requiera un mayor conocimiento o cierta experimentación para lograr el proceso de deposición más económico y eficiente. En las operaciones de electrodeposición, una corriente de ~1 A y un tiempo de ~45 minutos son comunes.

22-4 La corriente de corrosión y la polarización

Para proteger los metales de la corrosión, queremos que la corriente sea lo más pequeña posible. Desafortunadamente, la corriente de corrosión es muy difícil de medir, controlar y predecir. Parte de esta dificultad puede atribuirse a varios cambios que se presentan durante la operación de la celda de corrosión. Un cambio en el potencial de un ánodo o cátodo, que a su vez afecta a la corriente en la celda, se conoce como **polarización**. Hay tres tipos importantes de polarización: 1) activación, 2) concentración y 3) de resistencia.

Polarización de activación Este tipo de polarización se relaciona con la energía necesaria para hacer que se presenten reacciones en el cátodo o en el ánodo. Si podemos incrementar el grado de polarización, estas reacciones ocurrirán con mayor dificultad y se reducirá la tasa de corrosión. La polarización de activación cambia de forma dramática en función de pequeñas diferencias en la composición y estructura de los materiales que forman el ánodo o el cátodo. Los efectos de segregación en los electrodos hacen que varíe la polarización de activación de un lugar a otro. Estos factores dificultan la predicción de la corriente de corrosión.

Polarización de concentración Una vez iniciada la corrosión, probablemente cambie la concentración de iones en las superficies del ánodo o del cátodo. Por ejemplo, se puede producir una concentración más alta de iones metálicos en el ánodo si los iones no pueden difundirse con rapidez en el electrolito. Los iones hidrógeno se pueden agotar en el cátodo en el caso de un electrodo de hidrógeno, o se puede desarrollar una elevada concentración de $(OH)^-$ en el cátodo en el caso de un electrodo de oxígeno. Cuando esto ocurre, la reacción anódica o catódica se sofoca, debido a que se liberan menos electrones en el ánodo o se aceptan menos electrones en el cátodo.

En cualquiera de estos ejemplos, la densidad de corriente y, por tanto, la tasa de corrosión, se reduce debido a la polarización de concentración. Normalmente, la polarización es menos pronunciada cuando el electrolito está muy concentrado, cuando se incrementa la temperatura o cuando se le agita vigorosamente. Cada uno de estos factores incrementa la densidad de corriente y estimula la corrosión electroquímica.

Polarización de resistencia Este tipo de polarización se presenta por la resistividad eléctrica del electrolito. Si se presenta una mayor resistencia al flujo de la corriente, se reduce la tasa de corrosión. De nuevo, el grado de polarización de resistencia puede modificarse con los cambios en la composición del electrolito durante el proceso de corrosión.

22-5 Tipos de corrosión electroquímica

En esta sección, veremos algunas de las formas más comunes que presenta la corrosión electroquímica. En primer lugar, existe el *ataque uniforme*. Cuando se coloca un metal en un electrolito, algunas regiones resultan anódicas en relación con otras. Sin embargo, la localización de estas regiones cambia e incluso se invierte de vez en cuando. Dado que las regiones anódicas y catódicas se desplazan continuamente, el metal se corroe uniformemente.

El *ataque galvánico* ocurre cuando ciertas áreas actúan siempre como ánodos, en tanto que otras lo hacen siempre como cátodos. Estas celdas electroquímicas se conocen como galvánicas y se pueden dividir en tres tipos: **celdas de composición**, **celdas de esfuerzo** y **celdas de concentración**.

Celdas de composición Las celdas de composición, o *corrosión metálica disimilar*, se presentan cuando dos metales o aleaciones, como el cobre y el hierro, por ejemplo, forman una celda electrolítica. Debido al efecto en la polarización de los elementos de aleación y de

TABLA 22-2 ■ Serie galvánica para el agua de mar

Anódica	Aleaciones de magnesio y magnesio	Anódica	Plomo
	Zinc		Estaño
	Acero galvanizado		Latón Cu-40% Zn
	Aluminio 5052		Aleaciones basadas en níquel (activas)
	Aluminio 3003		Cobre
	Aluminio 1100		Aleación Cu 30% Ni
	Alclad		Aleaciones basadas en níquel (pasivas)
	Cadmio		Aceros inoxidable (pasivos)
	Aluminio 2024		Plata
	Acero al bajo carbono		Titanio
	Hierro fundido		Grafito
	Soldadura 50% Pb 50% Sn		Oro
	Acero inoxidable 316 (activo)		Platino
		Catódica	

Según ASM Metals Handbook, vol. 10, 8a. ed., 1975.

las concentraciones del electrolito, las series fem quizá no nos digan cuál región se corroerá y cuál quedará protegida. En lugar de lo anterior, utilizamos una **serie galvánica**, en la cual se clasifican las distintas aleaciones en función de sus tendencias anódicas o catódicas en un ambiente en particular (tabla 22-2). Es posible encontrar una serie galvánica diferente para el agua de mar, para el agua dulce y para las atmósferas industriales.

El siguiente ejemplo es una ilustración de las series galvánicas.

EJEMPLO 22-5 Corrosión de un acoplamiento soldado de latón

Un acoplamiento de latón utilizado en una aplicación marina se une con soldadura de plomo y estaño. ¿Sufrirá corrosión el latón o la soldadura?

SOLUCIÓN

De las series galvánicas, encontramos que todas las aleaciones basadas en cobre son más catódicas que la soldadura de 50% Pb-50% Sn. Entonces, la soldadura es el ánodo y se corroe. De manera similar, la corrosión de la soldadura puede contaminar el agua en los sistemas de agua potable con plomo.

Las celdas de composición también se desarrollan en aleaciones de dos fases, donde una de éstas es más anódica que la otra. Dado que la ferrita es anódica en relación con la cementita en el acero, las pequeñas microceldas hacen que el acero se corra galvánicamente (Fig. 22-6). Casi siempre, una aleación de dos fases es menos resistente a la corrosión que una aleación de una sola fase de composición similar.

La **corrosión intergranular** se presenta cuando el precipitado de una segunda fase o la segregación en los límites de grano produce una celda galvánica. En las aleaciones de zinc, por ejemplo, impurezas como el cadmio, estaño y plomo se segregan en los límites de grano durante la solidificación. Los límites de grano son anódicos en comparación con el resto del grano, por lo que presentan corrosión metálica (Fig. 22-7). En los aceros inoxidable austeníticos, los carburos de cromo se pueden precipitar en los límites de grano [Fig. 22-6(b)]. La formación de los carburos utiliza cromo proveniente de la austenita adyacente a los límites. La austenita de bajo cromo (<12% Cr) en los límites de grano es anódica en relación con el resto del grano y la corrosión tiene lugar en los límites. En ciertas aleaciones de aluminio

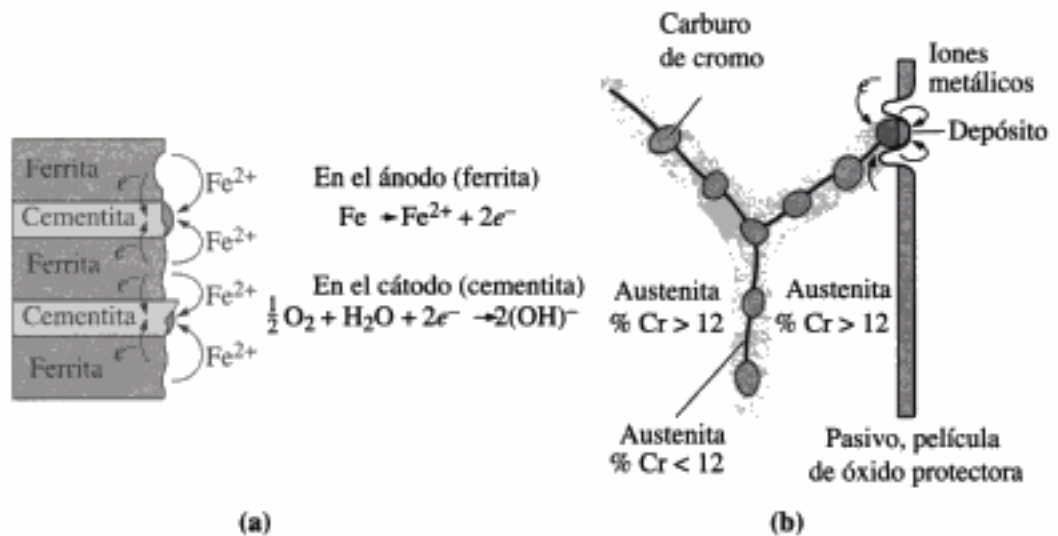


Figura 22-6 Ejemplo de celdas microgalvánicas en aleaciones de dos fases: (a) en el acero, la ferrita es anódica en relación con la cementita, (b) en el acero inoxidable austenítico, la precipitación del carburo de cromo hace que la austenita baja en Cr en los límites de grano sea anódica.

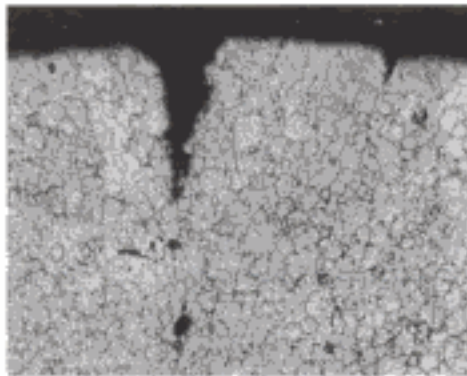


Figura 22-7

Microfotografía de corrosión intergranular en una fundición a presión de zinc. La segregación de impurezas en los bordes de grano produce celdas de corrosión microgalvánicas (50 $\times$).

trabajadas en frío, los límites de grano se corroen con rapidez debido a la presencia de precipitados perjudiciales. Esto hace que los granos de aluminio se desprendan como las páginas de un libro o como las hojas de las plantas. Esto se conoce como exfoliación.[8] Véase la fotografía en la portada de este capítulo como ilustración de este fenómeno.

Celdas de esfuerzo Estas celdas se desarrollan cuando un metal contiene regiones con esfuerzos locales diferentes. Las regiones con esfuerzos más elevados, es decir, las de más alta energía, actúan como ánodos en relación con las áreas catódicas con menos esfuerzos (Fig. 22-8). Las regiones con un tamaño más fino de grano, y que, por tanto, tienen una densidad más elevada de límites de grano resultan anódicas en relación con las regiones de granos gruesos del mismo material. Las áreas severamente trabajadas en frío son anódicas en relación con las que sufrieron menos trabajo.

La **corrosión por esfuerzo** se presenta por acción galvánica, pero otros mecanismos también pueden ocurrir, como por ejemplo, la absorción de impurezas en el extremo de una grieta existente. La falla se presenta como resultado de la corrosión y de un esfuerzo aplicado. A mayores esfuerzos aplicados el tiempo necesario para que se presente la falla se reduce.

Las fallas por fatiga también se inician o aceleran cuando ocurre la corrosión. La **fatiga por corrosión** puede reducir las propiedades de fatiga al iniciar grietas, quizá produciendo huecos o hendiduras e incrementando la velocidad con la cual se propagan las grietas.

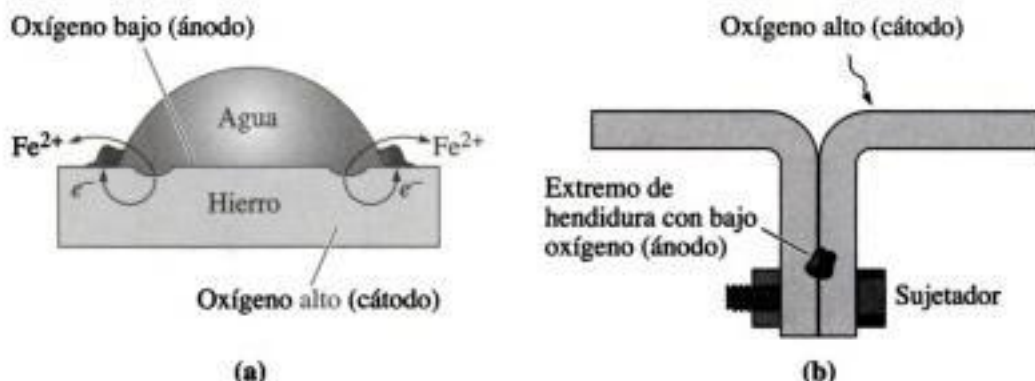


Figura 22-9 Celdas de concentración: (a) la corrosión ocurre por debajo de una gotita de agua sobre una placa de acero, debido a una baja concentración de oxígeno en el agua. (b) La corrosión ocurre en el extremo de una hendidura debido al pobre acceso al oxígeno.

el metal base circundante, el extremo de la grieta o la hendidura es el ánodo, que causa **corrosión por hendidura**.

Las tuberías enterradas se pueden corroer debido a diferencias en la composición del suelo. Las diferencias de velocidad pueden causar diferencias de concentración. El agua estancada contiene bajas concentraciones de oxígeno, en tanto que el agua en movimiento rápido y aireada contiene concentraciones más elevadas de oxígeno. El metal vecino al agua estancada es anódico y se corroe. A continuación damos un ejemplo de la corrosión debida al agua.

EJEMPLO 22-7 Corrosión por plegado del acero

Dos piezas de acero se unen mecánicamente plegando sus bordes. ¿Por qué sería esto una mala idea si posteriormente se expone el acero al agua? ¿Si el agua contiene sal, afectaría la corrosión?

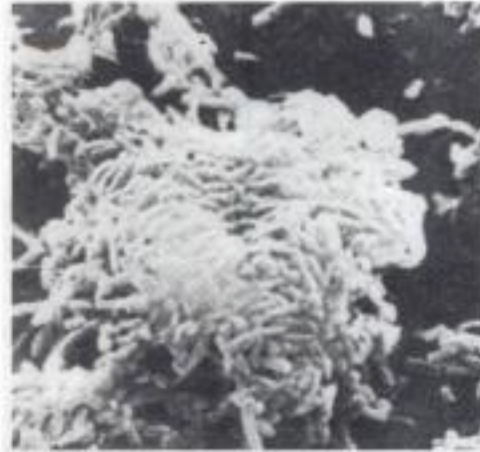
SOLUCIÓN

Al plegar los bordes del acero producimos una hendidura. La región de la hendidura queda expuesta a una menor cantidad de aire y de humedad, por lo que se comporta como ánodo en una celda de concentración. El acero de la hendidura se corroe.

La sal en el agua incrementa la conductividad de la misma, permitiendo la transferencia de una carga eléctrica a una mayor velocidad. Esto genera una densidad de corriente más elevada y, por tanto, una corrosión más rápida debido a una menor polarización por resistencia.

Corrosión microbiana Varios microbios, como los hongos y las bacterias, crean condiciones que fomentan la corrosión electroquímica. Particularmente en entornos acuosos, estos organismos crecen sobre superficies metálicas; normalmente, forman colonias que no son continuas. La presencia de las colonias y los subproductos del crecimiento de los organismos producen cambios en el entorno y, por tanto, cambios en la velocidad con que ocurren.

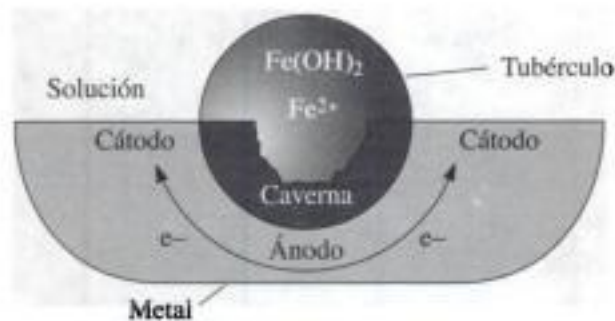
Algunas bacterias reducen los sulfatos del ambiente, produciendo ácido sulfúrico, el cual, a su vez, ataca el metal. Las bacterias pueden ser aeróbicas (que prosperan cuando hay oxígeno disponible) o anaeróbicas (que no necesitan oxígeno para crecer). Estos tipos de bacteria causan ataques sobre una diversidad de metales, incluyendo los aceros, los aceros inoxidable, el aluminio, el cobre, algunos materiales cerámicos y el concreto. Un ejemplo común se presenta en los depósitos de combustible de aluminio de las aeronaves. Cuando el combustible, que por



(a)

Figura 22-10

(a) Celdas bacterianas que crecen en una colonia (2700 $\times$). (b) Formación de un tubérculo y de una caverna bajo una colonia biológica.



(b)

lo común es queroseno, se contamina con humedad, crecen las bacterias y excretan ácidos. Estos ácidos atacan el aluminio, lo que finalmente crea fugas en el depósito de combustible.

El crecimiento de colonias de organismos en la superficie de un metal conduce al desarrollo de celdas de concentración de oxígeno (Fig. 22-10). Las superficies por debajo de las colonias son anódicas, en tanto que las áreas no afectadas son catódicas. Además, las colonias de organismos reducen la velocidad de difusión del oxígeno hacia el metal y, si el oxígeno se difunde en la colonia, los organismos tienden a consumirlo. La celda de concentración produce corrosión por debajo de las regiones cubiertas por los organismos. El crecimiento de éstos, que puede incluir productos de la corrosión del metal, genera acumulaciones (llamadas **tubérculos**) que pueden obstruir tuberías, ocluir sistemas de enfriamiento de agua en reactores nucleares, submarinos o en reactores químicos.

22-6

Protección contra la corrosión electroquímica

Se utilizan diversas técnicas para combatir la corrosión, incluyendo el diseño, los recubrimientos, los inhibidores, la protección catódica, la pasivación y la selección de materiales.

Diseño Un adecuado diseño de las estructuras de metal puede retrasar o incluso eliminar la corrosión. A continuación damos algunos de los pasos que deben darse para combatir la corrosión:

1. Impedir la formación de celdas galvánicas. Esto se puede lograr utilizando metales o aleaciones similares. Por ejemplo, es frecuente que las tuberías de acero se conecten a los muebles de plomería de latón, lo que produce una celda galvánica que causa la corrosión del acero. Mediante el uso de acoplamientos intermedios plásticos, al aislar eléctricamente el acero del latón, este problema puede minimizarse.

2. Hacer que el área del ánodo sea mucho mayor que la del cátodo. Por ejemplo, se pueden utilizar remaches de cobre para sujetar láminas de acero. En vista de la pequeña superficie de los remaches de cobre, ocurre una reacción catódica limitada. Si, por otra parte, se utilizan remaches de acero para unir hojas de cobre, la pequeña superficie anódica del acero cede muchos electrones, mismos que son aceptados por la mayor área catódica del cobre; la corrosión de los remaches de acero es entonces muy rápida. Esto se ilustra con el ejemplo siguiente.

EJEMPLO 22-8 Efecto de las áreas sobre la velocidad de corrosión para el par cobre-zinc

Veamos un par de corrosión cobre-zinc. Si la densidad de corriente del cátodo de cobre es de 0.05 A/cm^2 , calcule la pérdida en peso de zinc por hora, si 1) el área catódica del cobre es de 100 cm^2 y el área anódica del zinc es de 1 cm^2 y 2) si el área catódica del cobre es de 1 cm^2 y el área anódica del zinc es de 100 cm^2 .

SOLUCIÓN

1. Para el área anódica del zinc pequeña:

$$I = i_{\text{Cu}} A_{\text{Cu}} = (0.05 \text{ A/cm}^2) (100 \text{ cm}^2) = 5 \text{ A}$$

$$w_{\text{Zn}} = \frac{ItM}{nF} = \frac{(5)(3600)(65.38)}{(2)(96\,500)} = 6.1 \text{ g/h}$$

2. Para el área anódica del zinc grande:

$$I = i_{\text{Cu}} A_{\text{Cu}} = (0.05 \text{ A/cm}^2) (1 \text{ cm}^2) = 0.05 \text{ A}$$

$$w_{\text{Zn}} = \frac{ItM}{nF} = \frac{(0.05 \text{ A/cm}^2)(3600 \text{ s}) \left(65.38 \frac{\text{gm}}{\text{mol}}\right)}{(2)(96\,500 \text{ C})} = 0.061 \text{ g/h}$$

La velocidad de corrosión del zinc se reduce de manera significativa cuando el ánodo de zinc es mucho mayor que el cátodo.

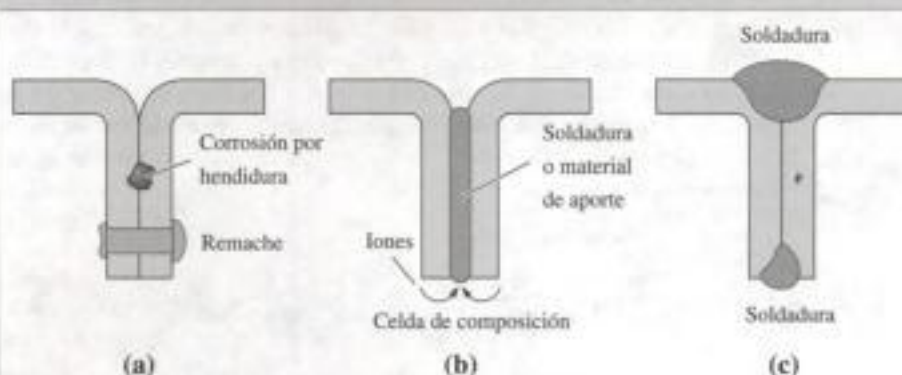


Figura 22-11 Métodos alternos para unir dos piezas de acero: (a) sujetadores que pueden producir una celda de concentración, (b) soldadura con y sin aporte que puede producir una celda de composición y (c) la soldadura con metal de relleno que coincide con el metal base puede evitar la formación de celdas galvánicas.

3. Diseñe los componentes de modo que los sistemas de fluidos estén cerrados y no abiertos, y de manera que no se formen charcos estancados de líquido. Los depósitos parcialmente llenos sufren de corrosión por línea de agua. Los sistemas abiertos disuelven continuamente gases, produciendo iones que participan en la reacción catódica y que fomentan las celdas de concentración.
4. Evite hendiduras entre materiales ensamblados o unidos (Fig. 22-11). La soldadura permanente (metalúrgica) puede resultar una mejor técnica de unión que el latonado, el estañado o la sujeción mecánica. En la soldadura no permanente, como el latonado y el estañado, se desarrollarán celdas galvánicas debido a que los materiales de relleno tienen una composición diferente del metal que unen. Los sujetadores mecánicos producen hendiduras que son generadoras de celdas de concentración. En cambio, si el metal de aporte se acerca mucho al metal base, la fusión y posterior solidificación de ambos, característico de la soldadura permanente, puede impedir que se desarrollen esas celdas.
5. En algunos casos, no se puede reducir la velocidad de corrosión hasta un nivel que no interfiera con la vida útil esperada del componente. En estos casos, deberá diseñarse el ensamble de tal manera que la parte corroída pueda reemplazarse fácil y económicamente.

Recubrimientos Los recubrimientos se utilizan para aislar las regiones anódica y catódica; también impiden la difusión del oxígeno o del vapor de agua que son iniciadores de corrosión o de oxidación. Los recubrimientos temporales, como por ejemplo, la grasa y el aceite, proporcionan cierto nivel de protección, pero son fácilmente superados. Los recubrimientos orgánicos, como la pintura, o los recubrimientos cerámicos, como el esmalte y el vidrio, dan una mejor protección. Sin embargo, si se destruye el recubrimiento, se expone un pequeño sitio anódico que sufre de una corrosión rápida y localizada.

Los recubrimientos metálicos incluyen el acero estañado y el galvanizado por inmersión en caliente (recubierto de zinc) (Fig. 22-12).[7] Esto se analizó en capítulos anteriores referentes a los metales ferrosos. Un recubrimiento continuo de cualquiera de estos metales aísla al acero del electrolito. Sin embargo, cuando se raspa el recubrimiento exponiendo el acero subyacente, los dos recubrimientos se comportan de manera diferente. El zinc sigue siendo eficiente, dado que es anódico en relación con el acero. Como el área del cátodo expuesto del acero es pequeña, el recubrimiento de zinc se corroe a una velocidad muy lenta y el acero se mantiene protegido. Sin embargo, el acero es anódico en relación con el estaño, por lo que se crea un minúsculo ánodo de acero al raspar la cubierta de estaño y de inmediato se presenta una rápida corrosión del acero.

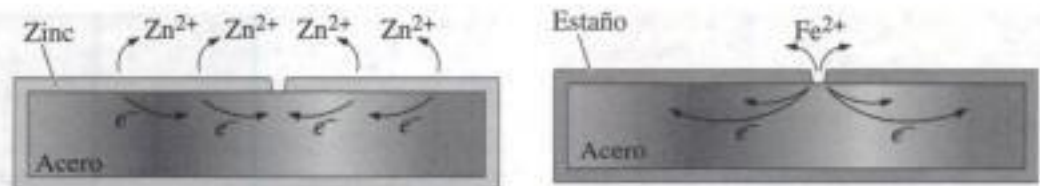


Figura 22-12 El acero recubierto con zinc y el acero recubierto con estaño se protegen de manera distinta. El zinc protege al acero incluso cuando desaparece el recubrimiento, dado que el zinc es anódico en relación con el acero. El estaño no protege al acero cuando se destruye el recubrimiento, dado que el acero es anódico con respecto al estaño.

Los recubrimientos de conversión química se producen por una reacción química con la superficie. Los líquidos como las soluciones de ortofosfato de zinc ácido forman una capa adherente de fosfato sobre la superficie del metal. Sin embargo, la capa de fosfato es algo porosa y

Texto clásico de ciencia e ingeniería de los materiales, que en esta nueva edición presenta un contexto de innovación en numerosas áreas de la ingeniería, pues se reescribieron y actualizaron temas que se incorporaron a esta disciplina, como son materiales electrónicos, magnéticos, fotónicos y propiedades térmicas de los materiales. Sin embargo, conserva su pedagogía característica para describir los fundamentos de esta disciplina y ejemplificarlos con aplicaciones actuales.

Características

- Introduce conceptos como la nanodureza y características microestructurales de la fractura en cerámicos, vidrios y materiales compuestos.
- Integra elementos en el diseño con probabilidad de falla (distribución Weibull).
- La reorganización de las secciones permite delimitar cada uno de los enfoques y niveles de aplicación de la ciencia e ingeniería de los materiales.



MÉXICO Y AMÉRICA CENTRAL
Tel. (52(55)) 1500-6000
Fax (52(55)) 5281-2696
editor@thomsonlearning.com.mx
México, D.F., MÉXICO

AMÉRICA DEL SUR
Tels. (5411) 4833-3838/3883
Fax (5411) 4831-0794
thomson@thomsonlearning.com.ar
Buenos Aires, ARGENTINA

EL CARIBE
Tel. (787) 758-7580
Fax (787) 758-7573
thomson@coqui.net
Hato Rey, PUERTO RICO

PACTO ANDINO
Tel. (571) 340-9470
Fax (571) 340-9475
cliente@thomsonlearning.com.co
Bogotá, COLOMBIA

ESPAÑA
Tel. (3491) 446-3350
Fax (3491) 445-8218
clientes@paraninfo.es
Madrid, ESPAÑA

